SCIENCES ET AVENIR

SPÉCIAL 70 PAGES

IA

Ce qu'elle change

- Détection du cancer
- Preuves mathématiques
- Optimisation de l'agriculture
- Robots d'assistance autonomes
- Soins ultrapersonnalisés
- Espèces fantômes en paléontologie
- Matériaux révolutionnaires
- Analyse d'images spatiales...

+ LES MEILLEURES APPLIS

©ANTONKHRUPINART/SHUTTERSTOCK

SCIENCES ET AVENIR - N° 935 - JANVIER 2025 - SPÉCIAL INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

JANVIER 2025 - N° 935 - ALLEMAGNE 7,40 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / PORTUGAL 5,70 € / DOM 5,90 € / TOM 800 XPF / ILE MAURICE : 8,60€ / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $

L 13418 - 935 H - F: 5,30 € - RD

Finalement le meilleur des plans B,

Les investissements sur les unités de compte, soumises aux fluctuations du marché, peuvent varier tant à la baisse qu'à la hausse et présentent un risque de perte en capital supporté intégralement par le souscripteur/adhérent.

HSBC Assurances Vie (France) - Entreprise régie par le code des assurances - Société Anonyme au capital de 115 000 000 euros - Siren 338 075 062 RCS Nanterre - N° Ademe : FR232701_03ZAGT - Siège social : Immeuble Cœur Défense, 110 esplanade du Général de Gaulle, 92400 Courbevoie - Adresse postale : 38 avenue Kléber, 75116 Paris. CCF - S.A. au capital de 147 000 001 euros, agréée en qualité d'établissement de crédit et de prestataire de services d'investissement, immatriculée au RCS de Paris sous le numéro 315 769 257 - Siège social : 103 rue de Grenelle 75007 Paris. Intermédiaire en assurance immatriculé à l'Orias sous le numéro 07 030 182 (www.orias.fr). Crédit image : Getty Images. Photo retouchée. Agence : Hungry and Foolish.

CCF | HSBC Assurances

c'est peut-être un plan A.

A comme assurance vie.
Une assurance vie qui allie l'expertise patrimoniale de la banque CCF avec sa gamme large de supports d'investissement premium au sein des contrats multi-primés de HSBC Assurances, pour vous permettre de constituer votre patrimoine, et de concrétiser vos projets... ou les siens.

Prenez rendez-vous avec la banque patrimoniale CCF sur ccf.fr

35 SCIENTIFIQUES
PARTICIPENT À CE NUMÉRO

La Recherche

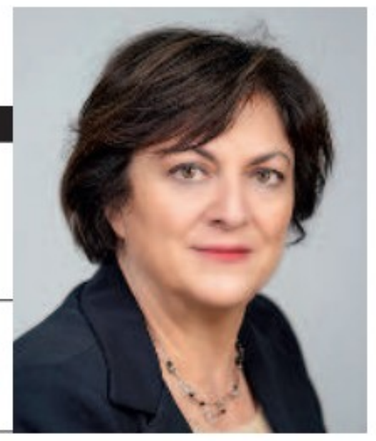
LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE

Chez votre marchand de journaux

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

ÉDITORIAL

Dominique Leglu
Directrice éditoriale



BERNARD MARTINEZ

Inspirants Reeves et Coppens

C'étaient deux amis de *Sciences et Avenir* dont le visage est apparu sur nombre de couvertures puis les écrits dans nos pages, tant leur talent de vulgarisateur les éclairait. Deux scientifiques disparus auxquels des hommages admiratifs ont été rendus dernièrement par leurs pairs. Pas de discours empêtrés dans du conventionnel mais l'accent mis sur leur contribution académique majeure. Sur l'importance de leurs travaux, qui ont de quoi susciter de nouvelles recherches, aujourd'hui. Hubert Reeves et Yves Coppens, deux figures inspirantes.

Lucy l'australopithèque. Avec le paléoanthropologue qui arpenta la planète dès son plus jeune âge, commençant par déterrer des os de vache près de Vannes — il aimait faire rire ses auditeurs avec cette anecdote —, le souvenir se porte immédiatement sur Lucy (*lire notre numéro spécial « Moi, Lucy et la paléontologie »*). Le cinquantenaire de la découverte de cette australopithèque de l'Afar — notre cousine d'il y a 3,2 millions d'années, disait Yves Coppens — a été célébré au Muséum national d'histoire naturelle en novembre dernier. Tout particulièrement par la voix de Raymonde Bonnefille, auteure de *Sur les pas de Lucy* (éd. Odile Jacob).

Climat fluctuant. Que dit aujourd'hui celle qui fut la spécialiste des pollens (50 000 récoltés) lors de l'International Afar Research Expedition ? Qu'il faudrait reprendre les études sur l'environnement d'*Australopithecus Afarensis*, espèce qui a survécu pendant 900 000 ans, trois fois plus que nous, *Homo Sapiens*. Qu'est-ce qui a fait son « succès », alors même que le climat d'Afrique de l'Est connaissait moult fluctuations ? Comment ces petits gabarits de quelques dizaines de kilos ont-ils résisté en arpentant les environnements changeants du pliocène ? Question d'actualité pour nous qui sommes en prise avec le réchauffement de l'anthropocène…

Astronautes d'Apollo. C'est à la même injonction de reprendre ses travaux que les scientifiques amis de Hubert Reeves ont invité, lors du colloque en son honneur, au CNRS en octobre dernier. Engageant notamment à préciser par de nouvelles mesures la quantité de deutérium cosmologique. Un élément fondamental auquel l'astrophysicien avait consacré un article en 1972 avec Johannes Geiss, après sa détection par un appareillage génial doté de feuilles de mica, placé sur la Lune par les astronautes d'Apollo !

Matière noire. Pareille mesure est d'importance primordiale, permettant de mieux évaluer le rapport entre matière ordinaire — celle des atomes, planètes et galaxies que nous connaissons — et la matière de tout l'Univers. De quoi guider vers la « matière noire » qui échappe encore à toute détection. Dans le même temps, d'autres amis sont inspirés, eux, par l'humaniste que fut Hubert Reeves. L'académicien Bernard Chevassus-au-Louis a ainsi lancé une souscription — *Sciences et Avenir* le soutient — pour l'installation d'un buste en bronze dédié à celui qui fut président de « Humanité et biodiversité », dans le jardin face à son ancien domicile parisien. De quoi inspirer passantes et passants. ■

COURRIER

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

« Alerte aux plastiques dans nos aliments »
(*Sciences et Avenir* n° 932, octobre 2024)

Pourquoi classez-vous les canettes et conserves dans les emballages pouvant polluer nos aliments avec du plastique, alors qu'ils peuvent plutôt être une alternative aux emballages plastiques, surtout la canette ?

Pascal Villain

S. et A. : Des polluants peuvent encore migrer des boîtes de conserve ou des canettes vers les aliments. Par exemple, une étude préliminaire menée en 2023 par des chercheurs du Laberca (UMR Oniris-Inrae) visait à caractériser les substances migrant des revêtements internes de boîtes de conserve vers les légumes contenus. En effet, à la suite de l'interdiction en France depuis 2014 des revêtements en résine d'époxy à base de bisphénol A, la nature des revêtements s'est diversifiée et des surfaces internes en polyesters les ont remplacés. Or selon cette étude, des oligoesters, produits de réactions incontrôlées dans la synthèse des revêtements à base de polyesters, peuvent apparaître dans les denrées (ici les légumes égouttés), avec une concentration moyenne cumulée estimée à 330 µg/kg (de 43 à 1600 µg/kg).

Production d'insuline

Dans le dossier sur « la molécule miracle » (*S. et A.* n° 931), en expliquant le fonctionnement du GLP-1, vous écrivez, page 57, que le glucagon est une hormone qui active la libération d'insuline. Mais il me semble que le glucagon fait remonter la glycémie en activant la libération de glucose par le foie. Cela étant, votre revue est passionnante, avec des thèmes variés. Je l'apprécie tellement que je me suis réabonné pour deux ans.

Dominique Hibon

S. et A. : Merci pour votre lecture attentive et votre remarque tout à fait justifiée, qui mérite une précision supplémentaire. Historiquement, on a longtemps pensé que le glucagon agissait sur la glycémie de façon contraire à l'insuline en activant la libération de glucose dans le sang à partir du glycogène dans le foie, alors que l'insuline favorise sa capture. Ce raisonnement binaire ne tient plus depuis plusieurs années, car on s'est aperçu que le glucagon était aussi très important pour faciliter la production d'insuline par les cellules bêta des îlots de Langerhans du pancréas en présence de glucose.
De plus, sa sécrétion par les îlots alpha du pancréas est surtout provoquée par certains acides aminés issus de la digestion, et il activerait ensuite leur absorption et leur utilisation par le foie. Il ressort de ces travaux qu'un rôle plus général est tenu par cette hormone lors de la digestion, en lien étroit avec les autres hormones libérées pour aider à l'assimilation des nutriments. Dans le texte est évoqué *« le développement de nouvelles molécules stables »* capables de mimer à la fois le GLP-1, le GIP, le glucagon, car elles pourraient, d'après ces récents travaux, être encore plus puissantes pour stimuler la production d'insuline et l'utilisation du glucose par l'organisme. C'est déjà le cas du rétatrutide, dont les premiers essais cliniques donnent des résultats intéressants et dont on risque de reparler bientôt.

La science, CQFD.
Natacha Triou
DU LUNDI AU JEUDI
16H – 17H
> Disponible sur le site et l'appli Radio France.

© Radio France/Ch. Abramowitz
En partenariat avec
SCIENCES ET AVENIR
france culture
L'esprit d'ouverture

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Intelligence augmentée

Lorsque nous avons entrepris de concevoir un numéro spécial sur l'intelligence artificielle (IA), notre titre de travail était « Ce qu'elle va changer ». Nos journalistes se sont alors plongés dans une vaste enquête, explorant la manière dont l'IA imprègne non seulement notre quotidien, mais aussi l'intégralité des disciplines scientifiques. Très vite, nous avons compris que cette formulation au futur était une erreur. Dans tous les domaines, la révolution de l'intelligence artificielle est déjà en marche, souvent depuis bien avant l'émergence de ChatGPT, que l'on considère parfois — à tort — comme le point de départ de cette transformation. « Ce qu'elle change », au présent, est bien plus juste.

Lorsque l'intelligence artificielle se conjugue à l'intelligence humaine, elle ouvre des horizons insoupçonnés

Aucun des articles de ce numéro n'aurait vu le jour si l'intelligence artificielle n'existait pas. Et pourtant, nous avons décidé — comme dans chaque numéro — de ne jamais lui confier l'écriture ni l'illustration.

Si nous utilisons parfois des outils d'aide à la transcription ou à la retouche d'image, ils demeurent strictement au service du journaliste, en respectant notre engagement fondamental : préserver votre confiance en la qualité de *Sciences et Avenir* et l'intégrité d'un travail résolument humain.

En 2019, Luc Julia, expert français mondialement reconnu en IA, publiait *L'Intelligence artificielle n'existe pas* (éd. First). Derrière ce titre provocateur, une vérité fondamentale : l'IA, contrairement à l'humain, ne comprend rien ; elle produit des résultats sans garantie de véracité. Pour autant, lorsqu'elle se conjugue à l'intelligence humaine, elle ouvre des horizons insoupçonnés. « IA » ne devrait plus désigner les algorithmes, mais la façon dont nous pouvons développer, avec eux, une « intelligence augmentée ». ■

VOUS ÊTES ÉTUDIANT
ABONNEZ-VOUS DÈS MAINTENANT
profitez d'une remise exceptionnelle
en scannant ce QR code

SCIENCES ET AVENIR

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (11 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15
Rédaction en chef hors-série Vincent REA - 01.55.35.56.35 avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52 Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31 Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59 - Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28 Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la rédaction en chef Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78, Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23 Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27 Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Sylvie BENZONI-GAVAGE, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, Claire MATHIEU
Ont participé à ce numéro P. BERLOQUIN, A. CARLIEZ, F. COSTES, J. DE COUCY, L. DUTHOIT, N. GUTIERREZ C., G. HOLUBOWICZ, P. KALDY, E. LECOMTE, C. MAUGER, K. NIKITINE, A. REZGUI, E. TISSANDIÉ, V. GLAVIEUX
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32 Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines William AFTHONIADES - wafthoniades@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Sarah RABBAH
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directrice de publicité Caroline GILLES - 01.44.88.89.03
Exécution : Emilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable du marketing direct Lina QUACH - 01.55.35.56.63
Partenariats et événements – Alain SCEMAMA - 01.58.65.03.58

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org

FR

ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte une lettre de « bienvenue aux abonnés » et les messages « L'Histoire » jetés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés.
Commission paritaire n° 0625 K 79712.
ISSN 3040-0457. Distribué par MLP.

CHERBOURG, LÀ OÙ COMMENCENT LES HISTOIRES.

TITANIC

LE REDOUTABLE

LA CITÉ DE LA MER

Création : agence ÅSGARD Illustration : Flore Maquin

leCotentin COMMUNAUTÉ D'AGGLOMÉRATION

edeis La Culture partout et pour tous

citedelamer.com

LA CITÉ DE LA MER CHERBOURG

SOMMAIRE

Sciences et Avenir / N° 935 / Janvier 2025

DOSSIER SPÉCIAL

IA

p. 24

Désormais omniprésente dans notre quotidien avec le développement d'outils d'aide à la création de textes, d'images ou de sons, l'intelligence artificielle est aussi une alliée précieuse pour les scientifiques dans leurs domaines de recherche.

FONDAMENTAL

42 Des robots experts dans la conception de nouveaux matériaux

46 Les théorèmes à l'heure de l'innovation algorithmique

49 Le boom de la robotique humanoïde

52 Un outil pour scruter l'Univers et la matière

NATURE

54 Agriculture : les fermes connectées gagnent du terrain

59 Un œil numérique décrypte les sols

62 Modéliser l'océan permettra de percer ses secrets

64 Le grand recensement du monde animal et végétal

SANTÉ

66 Médecine : l'ère du diagnostic automatisé

71 En Chine, une ville-hôpital virtuelle

72 Réparer l'humain avec des implants cérébraux

75 La structure des protéines résolue

78 **Nutrition :** ChatGPT au menu de nos repas ?

HISTOIRE

80 Archéologie : une fabuleuse moisson de découvertes

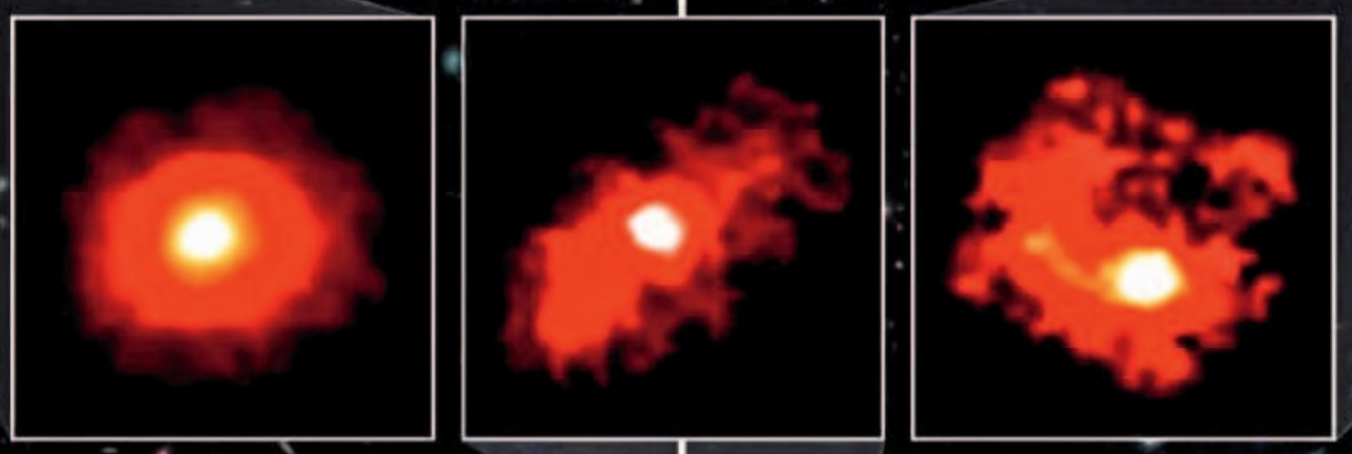
84 Un logiciel comble les lacunes des archives fossiles

86 **Histoire des sciences :** Dartmouth, 1956 : la naissance de l'intelligence artificielle

P. 5 ÉDITORIAL par Dominique Leglu **P. 6 COURRIER** Vos questions, nos réponses **P. 7 ÉDITO** par Mathieu Nowak

P. 10 ACTUALITÉS **Fondamental** Ces monstres galactiques défient les modèles / Une avancée vers les supersolides **Nature** Découverte du plus grand corail du monde / Les pignons de pin sont sensibles à la chaleur **Santé** Le génome des bébés à la loupe / Premier traitement contre la maladie d'Alzheimer **Histoire** Un nouveau sauropode en Charente / À Pompéi, la génétique réécrit l'histoire **P. 90 TRANSVERSALES** **Sélection livres - Expositions - Chroniques** Climat par Christophe Cassou et Céline Guivarch / Mathématiques par Claire Mathieu / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar **Questions de lecteurs - Le ciel de janvier - Jeux**

PACUNAM/MARCELLO CANUTO & LUKE AULD-THOMAS - ENCHANTED TOOLS - VOISIN/PHANIE - PABLO XAVIER - STEVE DOLAN/ JOHN DEERE - JENNY NUSS/BERKELEY LAB



Deux à quatre fois plus massive que la Voie lactée, chaque galaxie du trio révélé par le James-Webb date du premier milliard d'années après le Big Bang.

Ces monstres galactiques défient les modèles

Trois galaxies rougeoyantes, tapies au fond des âges, constitueraient l'un des « chaînons manquants » de l'évolution de l'Univers.

Débusquées par le télescope spatial James-Webb, trois galaxies remontent au premier milliard d'années après le Big Bang, et préfigureraient les amas de galaxies, ces formidables concentrations de matière qui forment aujourd'hui la trame du cosmos. D'emblée, ces galaxies ont intrigué les astronomes car elles sont un peu *« monstrueuses »*, confie David Elbaz, directeur scientifique du département d'astrophysique au CEA Paris-Saclay, et coauteur d'un article publié dans *Nature*. *« Nous avons livré une vaste étude sur 36 galaxies lointaines, permettant d'avoir une vision complète du premier milliard d'années d'existence de notre univers. Et dans le lot, nous avons trouvé ces trois-là, qui ne cadrent pas avec les modèles de croissance des galaxies dont on dispose. »*

Des étoiles fabriquées à tour de bras

Non seulement elles sont énormes — la masse totale des étoiles de chaque galaxie varie entre deux et quatre fois celle de notre Voie lactée —, mais en plus elles continuent de fabriquer des étoiles à tour de bras : environ 1000 par an, 500 fois plus que notre galaxie. *« Selon les théories actuelles, les galaxies convertissent en moyenne 10 % des baryons* [protons et neutrons] *disponibles en étoiles. Ici, la conversion atteint 50 % »*, s'étonne le chercheur.

Pour expliquer une telle frénésie créatrice, les scientifiques ont une piste… *« L'Univers jeune est inhomogène : certaines zones contiennent plus de matière que d'autres. Et donc, dans ces zones denses, on peut s'attendre à observer des "concentrations" de galaxies ultramassives. Nous faisons ainsi l'hypothèse que ces trois galaxies préfigurent ce qui deviendra un amas de galaxies. »*

Il reste à comprendre les mécanismes qui permettent une conversion aussi efficace des atomes en étoiles. *« La solution se trouve probablement dans les filaments intergalactiques, des structures de gaz diffus reliant les galaxies. Ces filaments se formant dans une région dense, ils les auraient nourries avec une efficacité exceptionnelle, accélérant la formation d'étoiles »*, avancent les auteurs de l'étude.

Pour conforter leur hypothèse, les chercheurs souhaiteraient désormais observer ces « cordons ombilicaux » cosmiques. Mais ces structures froides rayonnent peu, et sont beaucoup moins denses que les galaxies… Les voir constitue l'un des défis majeurs de l'astronomie observationnelle. ■ **F. N.**

NASA/CSA/ESA, M. XIAO & P. A. OESCH (UNIVERSITY OF GENEVA), G. BRAMMER (NIELS BOHR INSTITUTE), DAWN JWST ARCHIVE

Des volcans sur la face cachée de la Lune

C'est l'un des enseignements qu'a permis l'analyse des échantillons prélevés par la sonde chinoise Chang'e 6.

JIN LIWANG / XINHUA / AFP

Des fragments de basalte — une roche volcanique — ont été retrouvés dans les échantillons rapportés sur Terre en juin dernier par la mission chinoise.

L'étude des tout premiers échantillons prélevés sur la face cachée de la Lune par la sonde chinoise Chang'e 6 montre que l'hémisphère sombre de notre satellite était volcaniquement actif il y a environ 2,8 milliards d'années. Récupérées en juin dernier au terme d'une mission inédite et unanimement saluée, les roches lunaires ont fait l'objet de deux analyses distinctes dans des études publiées respectivement par *Nature* et *Science*. L'âge de cette activité volcanique mesurée par datation radiométrique sur 143 fragments de basalte — une roche volcanique — s'est révélé plus jeune qu'attendu.
Par ailleurs, les scientifiques, ont pu estimer que les volcans ont été actifs sur la face cachée pendant au moins 1,4 milliard d'années. Ces premières analyses confirment des différences géologiques notables entre les deux faces de la Lune. ■ **H. J.**

EN DEUX MOTS

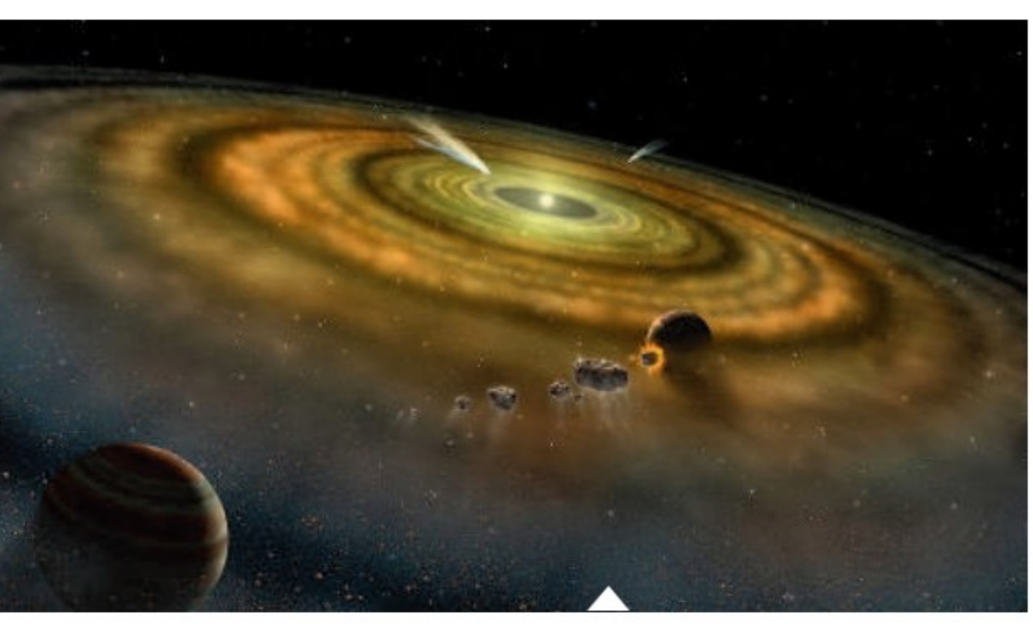
GRAVITÉ La Chine a inauguré le laboratoire d'hypergravité le plus avancé au monde, une centrifugeuse géante capable de produire une gravité 1900 fois supérieure à celle de la Terre. **NUCLÉAIRE** Un robot télécommandé a prélevé un minuscule morceau de combustible fondu au cœur d'un des réacteurs endommagés de la centrale nucléaire de Fukushima. **ASTROPHYSIQUE** L'observatoire HESS a détecté des particules cosmiques d'une énergie record, témoins de phénomènes extrêmes dont l'origine reste à élucider.

Un champ magnétique à l'origine du Système solaire

ASTROPHYSIQUE Des scientifiques ont retrouvé la trace d'un champ magnétique âgé de plus de 4,6 milliards d'années qui a façonné les confins du Système solaire lors de sa formation. Des indices décelés dans les grains de l'astéroïde Ryugu, rapportés sur Terre par la mission japonaise Hayabusa2 en 2020. **H. J.**

SOURCE : ELIAS MANSBACH, MIT, ÉTATS-UNIS.

NASA

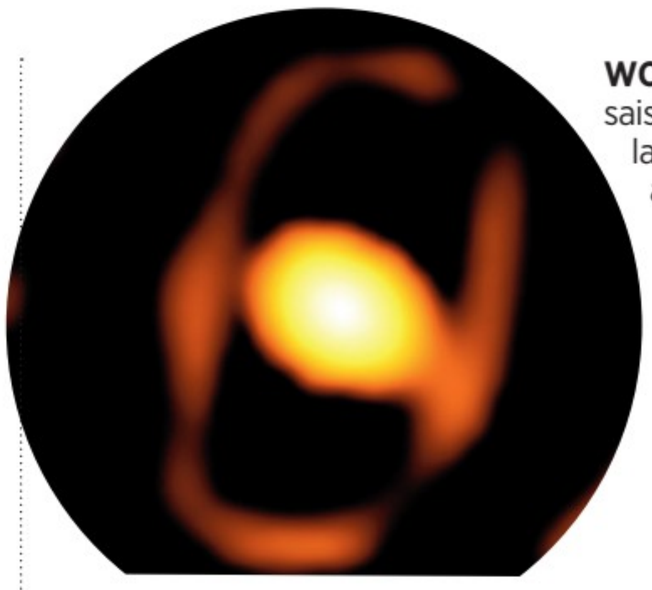


Vue d'artiste des poussières et des gaz entourant un système planétaire en formation.

Un caillou lavé à l'eau martienne

EXOGÉOLOGIE **Une analyse isotopique de la météorite de Lafayette, un fragment de Mars pesant environ 800 grammes, révèle qu'elle aurait été au contact d'eau liquide il y a 742 millions d'années, alors que le climat de la planète Rouge était trop froid pour permettre la formation de lacs et de rivières. Les chercheurs supposent que cette eau provenait de la fonte temporaire du pergélisol martien, causée par une activité magmatique.** **F. N.**

SOURCE : MARISSA TREMBLAY, UNIVERSITÉ PURDUE, ÉTATS-UNIS.



ESO/K. OHNAKA ET AL., L. CALÇADA

WOH G64 a été saisie par le Very large telescope, au Chili, à 160 000 années-lumière de la Terre. ◄

Premier portrait d'une étoile dans une autre galaxie

ASTRONOMIE C'est le premier gros plan d'une étoile située hors de la Voie lactée. Il a été réalisé au Very Large Telescope (Chili) par interférométrie. L'étoile WOH G64 se trouve à 160 000 années-lumière de nous, dans le Grand Nuage de Magellan. Elle est gigantesque — 1540 fois le rayon du Soleil — et mourante. Parvenue au stade de géante rouge, elle expulse du gaz et de la poussière. Elle explosera ensuite en supernova. **F. N.**

SOURCE : KEIICHI OHNAKA, UNIVERSITÉ ANDRÉS-BELLO, CHILI.

Des smartphones sur écoute

TECHNOLOGIE Les microvibrations produites par le son passant dans un téléphone portable peuvent être captées par un radar d'ondes millimétriques… et décodées ! Lors de tests avec un radar placé entre 25 et 125 cm du smartphone, 44,74 % des mots et 62,52 % des caractères ont été reconnus correctement, grâce à un modèle d'intelligence artificielle filtrant les vibrations parasites de la respiration ou des battements cardiaques de la personne. **A. D.**

SOURCE : SURYODAY BASAK, UNIVERSITÉ D'ÉTAT DE PENNSYLVANIE, ÉTATS-UNIS.

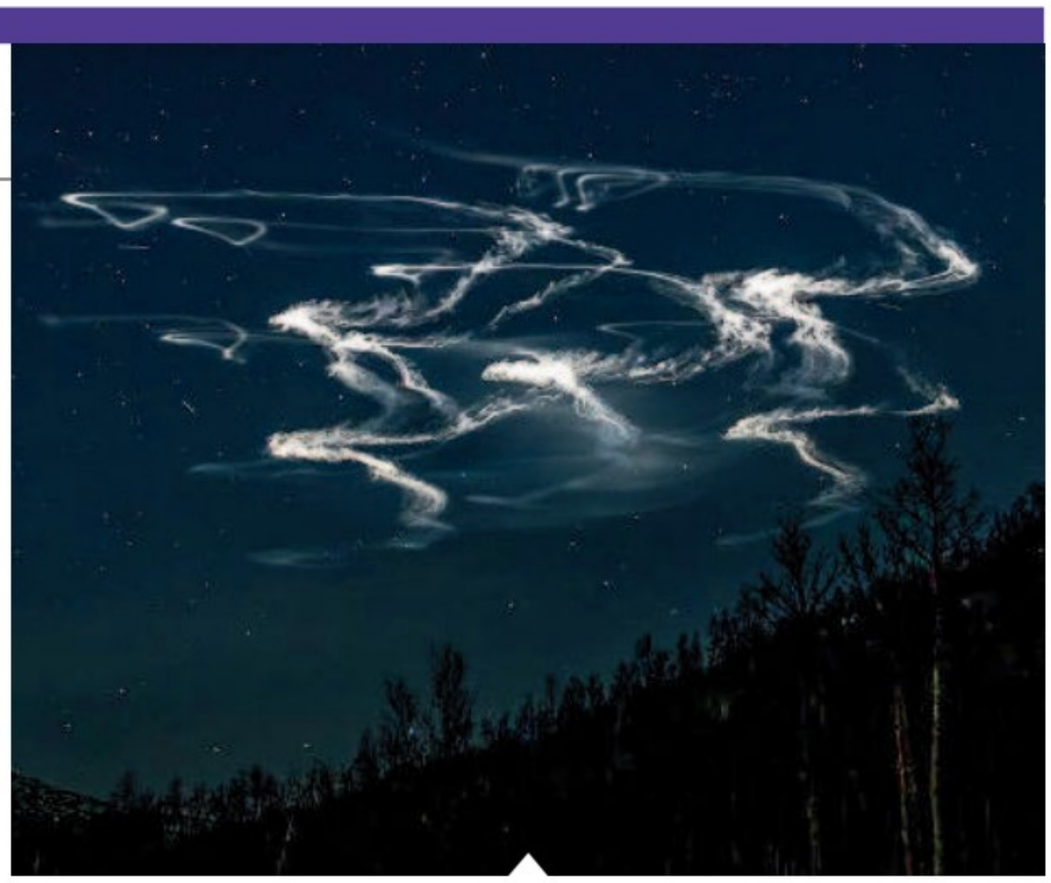
RoBoa, équipé d'une caméra, s'insinue dans des zones étroites où l'humain ne peut accéder.

ETH ZURICH

Un robot flexible pour les secours

ROBOTIQUE Ce tube gonflable en matériau souple appelé RoBoa s'étire jusqu'à 100 m de long et peut se contorsionner en tous sens pour se glisser dans des zones étroites, contaminées, encombrées, où ni l'humain ni des robots traditionnels ne peuvent aller. Par exemple, pour explorer les décombres de zones sinistrées. Piloté à distance, il peut être équipé à son extrémité d'une caméra, d'un micro ou autre capteur, et même acheminer de l'eau. **A. D.**

SOURCE : EPFL, ZURICH, SUISSE.



IVAR SANDLAND

Les volutes ont été générées avec un composé chimique largué par une fusée de la Nasa dans la haute atmosphère.

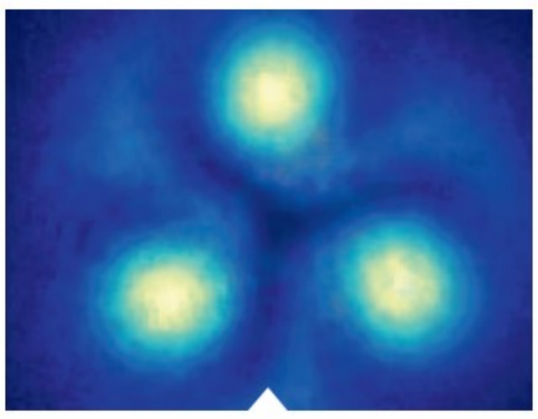
La Nasa crée des nuages afin de les étudier

ESPACE Le 10 novembre, le ciel d'aurores boréales du nord de la Norvège s'est soudain animé d'étranges nuages en forme de rubans tourbillonnants (*photo*). Il s'agissait en réalité de volutes de triméthylaluminium, un composé luminescent libéré par deux fusées-sondes pour l'expérience Vortex de la Nasa. Objectif : mieux comprendre les mouvements et les flux d'énergie traversant la haute atmosphère jusqu'à 500 kilomètres d'altitude — en particulier dans la région de la turbopause à environ 90 kilomètres — ainsi que l'influence de l'activité solaire. **S. R.**

Une avancée vers les supersolides

Des chercheurs apportent la preuve de l'existence d'un état extrême de la matière qui conjugue rigidité et fluidité.

« *Un supersolide est à la fois rigide et liquide, comme le chat de Schrödinger est à la fois vivant et mort* », résume Francesca Ferlaino, de l'université d'Innsbruck (Autriche). Avec son équipe, elle vient de faire un pas important vers cet état quantique de la matière, resté longtemps théorique, qui combine la rigidité cristalline d'un solide et l'écoulement sans viscosité, synonyme de superfluidité. L'agencement cristallin du côté « solide » avait déjà été observé. En revanche, les propriétés superfluides, plus difficiles à mettre en évidence, manquaient à l'appel. Les chercheurs ont réussi à en montrer une : des vortex quantiques, des tourbillons témoignant d'un écoulement sans friction. Ils ont pu les observer dans un gaz quantique formé de dysprosium refroidi près du 0 absolu (-273,15 °C), et mis en rotation grâce à un champ magnétique. Les implications de cette découverte vont de l'astrophysique — un tel état de la matière pourrait se trouver dans les étoiles à neutrons par exemple —, jusqu'à l'étude d'autres états quantiques remarquables, comme la supraconductivité. **F. N.**



UNIVERSITÉ D'INNSBRUCK

Simulation de trois vortex dans un supersolide, démontrant sa superfluidité.

25

Le nombre de lancements Starship prévus en 2025

ESPACE La Federal Aviation Administration, l'agence américaine chargée de la réglementation des vols et lancements spatiaux, a approuvé la demande de SpaceX d'augmenter de 5 à 25 le nombre de décollages annuels de son lanceur Starship. Soit un lancement tous les 15 jours, avec notamment l'objectif de préparer le retour sur la Lune prévu en 2027 avec le programme Artemis. **H. J.**

Impulscience®

Programme pour les chercheurs en sciences de la vie en France

Lauréats 2024

De gauche à droite :
Maxime Gauberti, *GIP Cyceron, Caen* — **Nicolas Minc,** *Institut Jacques Monod, Paris*
Elisa Gomez Perdiguero, *Institut Pasteur, Paris* — **Jérémie Barral,** *Institut de l'Audition, centre de l'Institut Pasteur, Paris*
Anja Böckmann, *Institut de Biologie et Chimie des Protéines, Lyon*
Stéphane Bugeon, *Institut de Neurobiologie de la Méditerranée, Marseille*
Gianni Liti, *Institut de Recherche sur le Cancer et le Vieillissement, Nice*

© William Beaucardet

Fondation Bettencourt Schueller

Reconnue d'utilité publique depuis 1987

0,5 %

La part de cerveau humain constituée de plastique

POLLUTION
Un rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, qui publie ce chiffre, s'alarme de l'impact sanitaire de notre exposition aux micro et nanoplastiques devenus partie intégrante de l'environnement. **S. R.**

PIETER-JAN D'HONDT

La bichromie de l'animal est un moyen de camouflage.

En Antarctique, un manchot tout noir

ORNITHOLOGIE Lors d'une expédition sur l'île de la Géorgie du Sud (océan Atlantique), le photographe belge Yves Adams a immortalisé un rarissime manchot royal au plumage d'un noir intense. Celui-ci est dû à une surproduction de mélanine. Un désavantage car il ne bénéficie pas du camouflage aquatique d'ombre inversée de son espèce : dans l'eau, le ventre blanc se fond d'en bas avec le ciel lumineux, tandis que le dos noir se fond d'en haut avec les eaux sombres. **H. J.**

MANU SAN FÉLIX / NATIONAL GEOGRAPHIC PRISTINE SEAS

Ce géant de l'océan Pacifique forme un réseau complexe de milliards de polypes.

Découverte du plus grand corail du monde

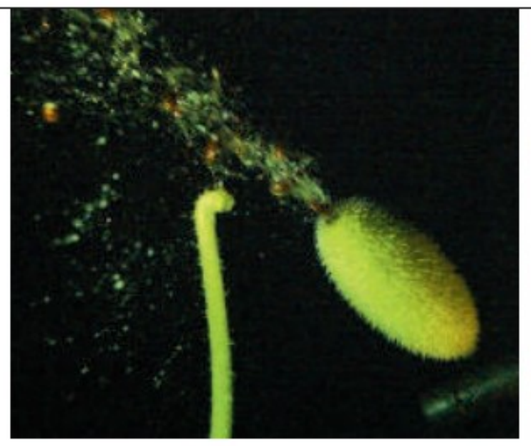
Cette formation d'une circonférence de 183 mètres est trois fois plus étendue que le précédent détenteur du record.

Au large des îles Salomon dans l'océan Pacifique, des scientifiques ont mesuré le plus grand corail jamais répertorié, *Pavona clavus*. Avec ses 34 mètres de large, 32 mètres de long et 5,5 mètres de haut, ce géant mesure l'équivalent de deux terrains de basket, soit trois fois plus que le précédent détenteur du record, « Big Momma » aux Samoa américaines. La découverte a pris tout le monde de court. Au début, les scientifiques pensaient même avoir trouvé une épave de bateau en raison de la taille impressionnante de la formation. Mais lorsqu'un photographe sous-marin a plongé à 12 mètres de profondeur, le mystère a été résolu : c'est bien un corail géant jusqu'ici inconnu ! Principalement brun avec des touches de bleu, jaune et rouge, il forme un réseau complexe de milliards de polypes. Ces invertébrés au corps mou ont mis 300 à 500 ans pour se développer, créant une formation d'une circonférence de 183 mètres. Bien que massif, ce corail diffère des récifs, qui sont constitués de plusieurs polypes coralliens, car il ne forme qu'une seule colonie.

Protégé par une pente sous-marine

La découverte est d'autant plus enthousiasmante que sa santé est exceptionnelle. *« Alors que les récifs peu profonds avoisinants ont souffert du réchauffement des mers, cette oasis corallienne est une lueur d'espoir »*, souligne Eric Brown, écologue marin au Service des parcs nationaux des États-Unis et spécialiste des coraux. Pour Helen Findlay, océanographe au Laboratoire marin de Plymouth (Royaume-Uni) n'ayant pas pris part à l'expédition, *« l'emplacement du corail, dans des eaux plus profondes et froides, pourrait expliquer sa préservation »*. Protégé par une pente sous-marine, il bénéficie de conditions idéales pour se développer, contrairement aux récifs exposés aux changements de température des eaux superficielles. Dans un contexte de dégradation des écosystèmes marins, cette découverte représente une rare bonne nouvelle pour l'avenir des récifs coralliens. ■

J. de C.



Le record des concombres du diable

BOTANIQUE *Ecballium elaterium* possède l'un des mécanismes d'éjection de ses graines parmi les plus étonnants au monde. En tout cas, le plus rapide connu. Cette cucurbitacée les propulse à près de 40 km/h quand le fruit sous pression arrive à maturation et explose littéralement *(photo)*. Une équipe britannique a analysé le phénomène et a mesuré une dispersion optimale qui répand les graines sur une surface d'une cinquantaine de mètres carrés. **H. R.**

DOMINIC VELLA

SOURCE : FINN BOX, UNIVERSITÉ DE MANCHESTER, ROYAUME-UNI.

Une enzyme naturelle dégrade le glyphosate

ENVIRONNEMENT

En analysant l'ADN présent dans des sols cultivés durant des années avec du glyphosate, des chercheurs ont découvert qu'une enzyme bactérienne s'est spécialisée dans la dégradation de l'herbicide le plus répandu au monde. La séquence génétique identifiée se révèle plus efficace que les formes fabriquées jusque-là en laboratoire. **P. K.**

SOURCE : MINGHUI MA, UNIVERSITÉ WILFRID-LAURIER, CANADA.

Un crapaud-puce de 6,95 mm

HERPÉTOLOGIE Au Brésil, des chercheurs ont identifié le deuxième plus petit amphibien au monde : le *Brachycephalus dacnis*. Grâce à un processus de miniaturisation, incluant la fusion des os du crâne et du post-crâne, ce crapaud de 6,95 mm conserve des traits typiques des espèces plus grandes. Pour le distinguer, une analyse acoustique et un séquençage ADN ont été réalisés. **J. de C.**

SOURCE : LUÍS FELIPE TOLEDO, INSTITUT BIOLOGIQUE DE SÃO PAULO, BRÉSIL.

LUCAS MACHADO BOTELHO

L'animal a été découvert dans la forêt brésilienne.

DAKOTA MCCOY

Le mollusque abrite des algues qu'il éclaire avec des minifenêtres.

Ce coquillage utilise la fibre optique

CONCHYLIOLOGIE La bucarde-cœur de Vénus (*Corculum cardissa*) dispose d'une coquille très perfectionnée permettant d'éclairer les algues qu'elle héberge dans son tube digestif, montre une étude. La lumière passe par de minuscules fenêtres faites de prismes de cristaux d'aragonite — une forme de calcaire — qui filtrent les UV nocifs, puis par une lentille qui focalise les rayons solaires sur les algues. **P. K.**

SOURCE : DAKOTA MCCOY, UNIVERSITÉ STANFORD, ÉTATS-UNIS.

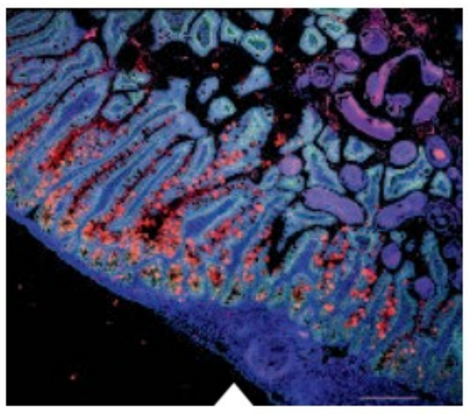
Les pignons de pin sont sensibles à la chaleur

Les pins maritimes dont les graines ont été soumises à des températures élevées produisent des arbres moins fertiles.

FCBA

Les graines du pin maritime mémorisent les températures liées à leur formation.

Les graines du pin maritime ont de la mémoire ! C'est le constat effectué par des chercheurs de l'Inrae et des universités d'Orléans et de Perpignan. Ils ont exposé des lots de graines possédant le même patrimoine génétique à des températures de 18, 23 et 28 °C lors de la formation de leur embryon. Puis ils ont regardé les arbres pousser. À deux ans, les clones soumis à la température idéale de 23 °C ont grandi plus vite que ceux soumis à une température inférieure ou supérieure. Les différences se sont estompées ensuite, ce qui signifie que les individus ont fini par perdre la mémoire du stress initial. Les chercheurs ont identifié dix gènes ayant accumulé des modifications de la méthylation de l'ADN, preuve d'une mémoire épigénétique qui est une réponse à un impact environnemental. Cette faculté pourrait expliquer une forte baisse de fertilité des pins maritimes. Depuis la fin des années 2010, les forestiers constatent en effet qu'ils produisent en moyenne deux fois moins de cônes, et ceux-ci ne contiennent plus qu'une cinquantaine de graines, contre trois fois plus auparavant. ■ **L. C.**



Marquage des différents types cellulaires sur un intestin grêle.

KLARMAN CELL OBSERVATORY, BROAD INSTITUTE

Une ébauche de l'atlas des cellules humaines

BIOLOGIE Le Human Cell Atlas, initiative regroupant plus de 3600 scientifiques dans 102 pays pour construire un atlas biologique des 37 000 milliards de cellules humaines, a publié les premières ébauches de cartes issues des travaux menés depuis 2016. Parmi la douzaine d'articles publiés dans *Nature*, certains devraient déjà permettre de mieux appréhender la façon dont la diversité cellulaire influence les réponses individuelles aux traitements médicaux. **H. J.**

19 %

La part des cas de dengue dus au changement climatique

INFECTIOLOGIE Près d'un cinquième des cas totaux de dengue (entre 100 et 400 millions par an dans le monde) sont imputables au changement climatique. Une estimation issue d'une étude coordonnée par l'université Stanford (États-Unis), présentée lors de la 29e conférence sur le climat de l'ONU mais non encore publiée. **S. R.-M.**

Le génome des bébés à la loupe

Des chercheurs américains ont lancé un dépistage des maladies génétiques à grande échelle auprès de 100 000 nouveau-nés.

YURI ARCURS/GETTY IMAGES

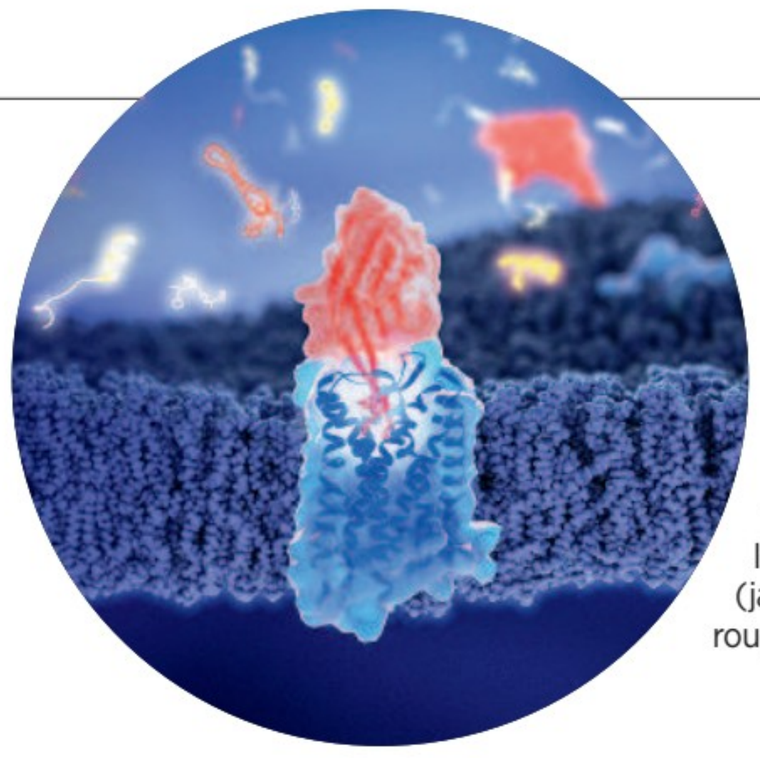
Le test, effectué peu après la naissance, porte notamment sur 156 maladies génétiques pouvant être traitées.

Dépister chez tous les nouveau-nés des maladies génétiques traitables n'est plus de la science-fiction, montre une expérience américaine présentée dans la revue médicale *Jama*. Le dépistage habituel trois jours après la naissance détecte dans une goutte de sang déposée sur un buvard des anomalies du métabolisme que l'on peut traiter par un médicament ou une alimentation adaptée. La récente possibilité de séquencer et d'analyser en quelques jours le génome entier des nouveau-nés à partir de ce même échantillon a convaincu des chercheurs américains de l'université Columbia à New York (États-Unis) de lancer un dépistage génomique à grande échelle auprès de 100 000 enfants. En un an, près de 4000 d'entre eux ont déjà été testés pour des gènes à l'origine d'épilepsies ou de 156 maladies génétiques connues et traitables.

En cours d'évaluation en France

Alors que seulement 26 de ces enfants ont été dépistés par la méthode classique, 110 bébés porteurs de mutations liées à des maladies génétiques ont été identifiés par la vérification de leur génome. Ces enfants ont souvent pu recevoir un traitement adapté, notamment pour l'épilepsie, la surdité, le nanisme ou un déficit immunitaire grave. Lancé en 2022, ce projet pilote nommé Guardian a pour objectif de mettre au point ce nouveau dépistage de masse pour l'appliquer un jour aux 210 000 naissances annuelles de l'État de New York. Il permettra de traiter précocement certaines maladies, ce qui est un gage d'efficacité, et d'éviter de mauvaises surprises ou une errance diagnostique ultérieures aux parents.

Le dépistage génomique se développera en tenant compte des découvertes grandissantes de la génétique médicale. Le test génétique néonatal généralisé est aussi en cours d'évaluation en France dans le cadre européen du projet Screen4Care. **P. K.**



Le nanocorps (en rose) vient bloquer les récepteurs (en bleu) auxquels se lient les opioïdes (jaune, blanc et rouge).

UNIGE

Des anticorps contre l'addiction aux opioïdes

ADDICTOLOGIE De minuscules protéines dérivées d'anticorps de lama ont été façonnées par des chercheurs pour se fixer aux récepteurs cellulaires humains liés aux opioïdes (fentanyl, morphine, héroïne, tramadol…). En bloquant l'action de ces drogues dans le cerveau, ces « nanocorps » pourraient offrir une option plus efficace que la naloxone pour atténuer les effets secondaires des opioïdes et mieux contrôler les risques d'overdose. **H. J.**

SOURCE : JUN YU, UNIVERSITÉ DE GENÈVE, SUISSE.

IL A DIT

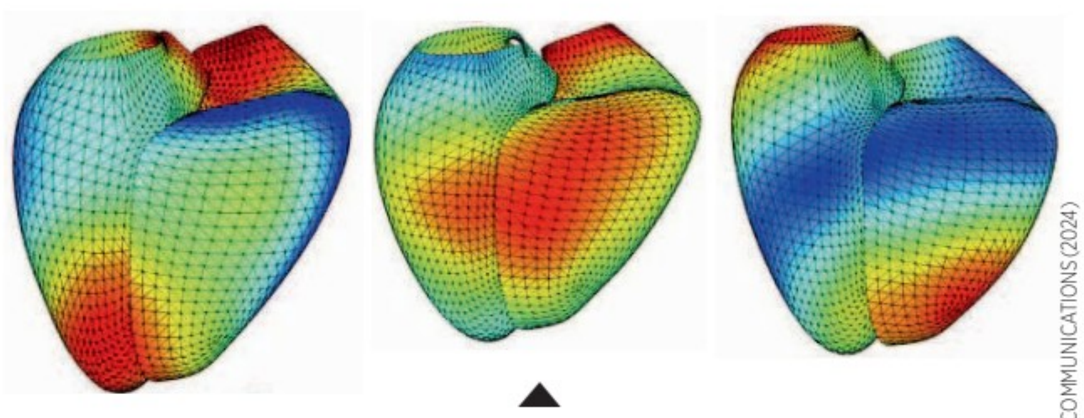
« Il existe un troisième état entre la vie et la mort »

Peter Noble, microbiologiste à l'université d'Alabama (États-Unis), a mis en évidence qu'après le décès d'un organisme, certaines de ses cellules conservent une activité génétique leur permettant de se réorganiser pour former de nouvelles structures de vie.

La forme du cœur prédit les maladies

CARDIOLOGIE Des analyses statistiques menées sur près de 40 000 patients mêlant imagerie et génétique ont permis de mettre en évidence 11 différentes formes de contour du cœur associées à des risques cardio-vasculaires. Des résultats qui pourraient déboucher sur un outil de prévention face aux maladies cardio-vasculaires, responsables de près de 18 millions de morts par an. **S. R.-M.**

SOURCE : RICHARD BURNS, KING'S COLLEGE LONDON, ROYAUME-UNI.



Modélisation 3D de trois des 11 formes de cœur identifiées et associées à des risques cardio-vasculaires.

NATURE COMMUNICATIONS (2024)

www.lesproduitsdumois.com

SOULAGEZ VOS MIGRAINES AVEC NOCICEPTOL® STICK MIGRAINE !

Conçu pour **soulager les maux de tête** tels que les migraines et les céphalées, ce **stick pratique et facile d'utilisation** offre un **soulagement ciblé** grâce à son action immédiate par le froid entraînant une vasoconstriction. Sa bille métallique massante apporte une fraîcheur supplémentaire et permet de **cibler les zones douloureuses**. Les huiles essentielles et les extraits de plantes apportent leurs bienfaits naturels. En particulier l'extrait de saule blanc et l'huile essentielle de menthe poivrée reconnus pour soulager les maux de tête.

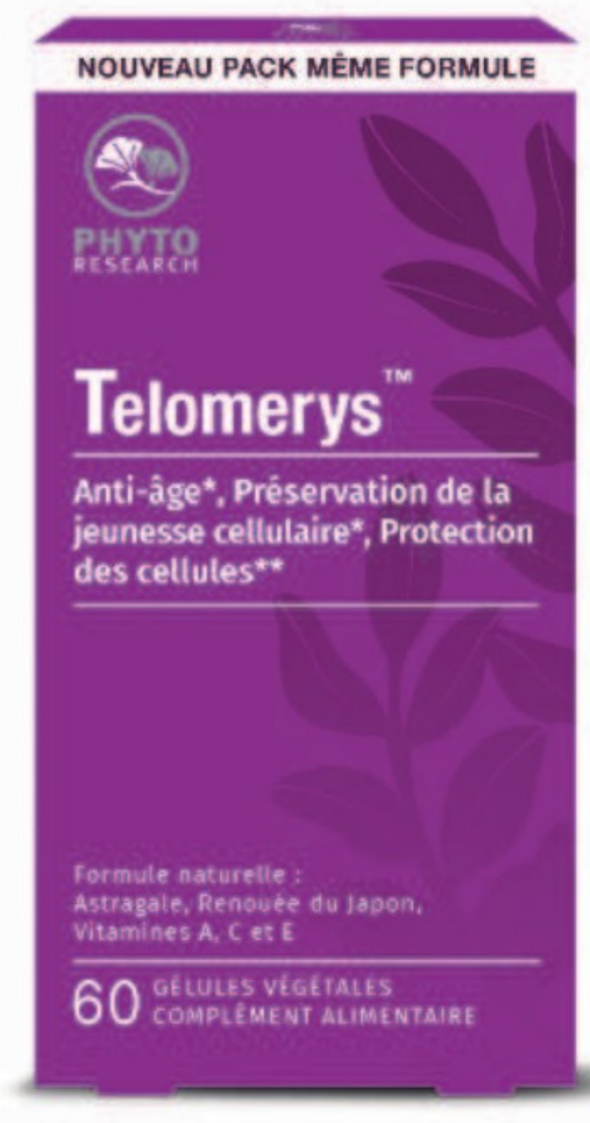
● En pharmacie ACL 6333750 le tube de 10mL 8.50€. - www.nociceptol.fr
Laboratoire POLIDIS 01 47 51 28 00 - Dispositif Médical CE. Lire les instructions avant utilisation.

ACOUPHÈNES, VERTIGES, REFLUX, MORAL EN BERNE, TROUBLES DU SOMMEIL, RONFLEMENTS ???

Découvrez la gamme AUDISTIMPHARMA !
(Acouphènes : Audistim / Vertiges : Audistim équilibre / Reflux : Mucodistim / Moral, troubles du sommeil : Safrastim+ Triple Action/ Ronflements : Ronchostim). A l'efficacité scientifiquement prouvée, **AUDISTIMPHARMA vous soulage !**

● En pharmacie, sur audistimpharma.com et au téléphone : 05 56 69 13 84

INNOVATION ANTI-ÂGE



Le laboratoire français **PhytoResearch** a mis au point une **formule naturelle** basée sur les résultats des dernières avancées scientifiques sur l'astragaloside IV, une substance issue de l'Astragale capable de **ralentir le vieillissement cellulaire.**

Telomerys associe un extrait concentré de racine d'Astragale à du resvératrol, un **puissant antioxydant**, ainsi que des **vitamines A, C et E. Formule anti-âge inédite**, deux gélules végétales par jour suffisent pour constater **une diminution significative des rides**, une **amélioration des fonctions cognitives** (mémoire, concentration) et un **regain d'énergie**.

● En pharmacie - Boîte de 60 gélules végétales - ACL 6024256 - Convient aux végétaliens - Plus d'infos au 01 83 96 83 01 (tarif local) - telomerys.com

POUR VOTRE SANTÉ, PRATIQUEZ UNE ACTIVITÉ PHYSIQUE RÉGULIÈRE
Pour paraître dans cette rubrique, R'Médias 01 46 48 85 41 - photos D.R.

FONDATION VAINCRE ALZHEIMER

QUESTIONS À

Dr Marion Lévy

Responsable études et recherche à la fondation Vaincre Alzheimer

« C'est le premier traitement contre Alzheimer »

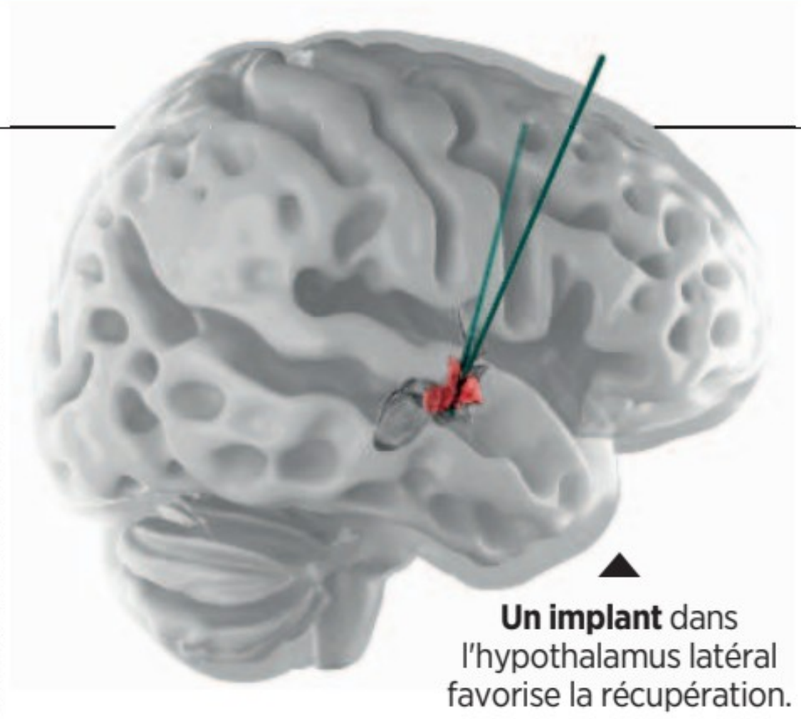
Après un refus initial l'été dernier, l'Agence européenne du médicament (EMA) est revenue sur sa décision et a donné son feu vert au Leqembi (lécanémab), premier traitement contre la maladie d'Alzheimer.

Comment accueillez-vous la décision de l'EMA ?
Nous sommes très satisfaits de cette nouvelle. Ce médicament était très attendu par les patients, qui n'avaient jusqu'ici que des traitements s'attaquant aux symptômes, lesquels ont été déremboursés. Le Leqembi est le premier à agir directement sur la maladie en éliminant les plaques de protéines amyloïdes dans le cerveau. Le bénéfice est modeste, mais il peut faire gagner cinq à sept mois sur le déclin cognitif, ce n'est pas négligeable.

Pourquoi l'agence a-t-elle changé d'avis ?
Le refus de l'été dernier était motivé par des effets indésirables : des hémorragies et œdèmes cérébraux observés après une élimination importante de dépôts amyloïdes. L'EMA a en fait réévalué la balance bénéfice-risque en excluant les patients porteurs d'une double copie du gène APOE4, car ce sont eux qui sont les plus susceptibles de subir ces effets.

Combien de patients seront concernés ?
C'est très difficile à évaluer, mais ce sera peu. D'abord parce que ceux porteurs du gène APOE4, plus à risque d'Alzheimer, seront exclus. Mais aussi parce qu'il ne sera prescrit qu'à des patients à un stade débutant de la maladie. Ça n'en reste pas moins une étape majeure pour les patients et la recherche. ■

Propos recueillis par H. J.



Un implant dans l'hypothalamus latéral favorise la récupération.

NEURORESTORE/EPFL 2024

La stimulation cérébrale au secours des paraplégiques

NEUROLOGIE La stimulation cérébrale profonde d'une région appelée hypothalamus latéral a permis d'améliorer la marche et de favoriser la récupération de deux patients atteints de lésions graves de la moelle épinière. Ceux-ci avaient précédemment reçu d'autres implants cérébraux testés depuis une dizaine d'années pour faire remarcher des patients paraplégiques, mais n'en avaient tiré qu'un bénéfice limité. La stimulation cérébrale profonde connue depuis les années 1970 peut ainsi améliorer la récupération des fonctions motrices. **H. J.**

SOURCE : GRÉGOIRE COURTINE, UNIVERSITÉ DE LAUSANNE, SUISSE.

Un test unique pour les maladies infectieuses

INFECTIOLOGIE Le séquençage de nouvelle génération a permis à une équipe américaine de mettre au point un test unique pour diagnostiquer en une fois n'importe quelle infection cérébrale (myélite encéphalite, méningite, etc.). Et ce en analysant tout le matériel génétique d'un seul échantillon de liquide céphalo-rachidien. Après confirmation de ses performances, les chercheurs l'ont adapté pour les infections respiratoires. Un test similaire est aussi développé en France, à l'Institut Pasteur. **A. R.**

SOURCE : PATRICK BENOIT, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE, ÉTATS-UNIS.

Les carnets de santé 2025 alertent sur les écrans

PÉDIATRIE Déployée à partir du 1er janvier, la nouvelle version des carnets de santé intègre des pages consacrées aux risques pour les enfants d'un temps trop long passé devant des écrans. Les parents y trouveront des recommandations, notamment celle d'éviter toute exposition jusqu'à l'âge de 3 ans. **H. J.**

L'activité musculaire fait pousser les neurones

BIOCHIMIE Une étude menée sur des cellules de souris montre que lors d'un exercice physique, les contractions musculaires produisent des molécules, les myokines, qui favorisent la croissance des neurones moteurs. Mises au contact de ces molécules lors d'expériences, les cellules nerveuses isolées se développaient ainsi beaucoup plus rapidement. **A.-S. T.**

SOURCE : ANGEL BU, MIT, ÉTATS-UNIS.

PLAINPICTURE

En se contractant, les muscles libèrent des molécules stimulant la croissance nerveuse.

PUBLICITÉ

Fonctionnement du cerveau

Mémoriser, raisonner, anticiper, planifier, comprendre… les capacités du cerveau sont illimitées.

Au rythme du cerveau

Le cerveau émet en permanence des ondes dont la fréquence dépend de son activité. Eveil, sommeil, phase intense de réflexion : pour chaque état cérébral, l'activité neuronale est caractérisée par un type d'onde.

Ondes alpha, bêta, gamma : leur rôle est complexe et leur émission par le cerveau dépend de nombreux facteurs, comme l'état psychologique ou encore l'alimentation.

Des études récentes ont par exemple montré le lien étonnant entre Thé vert et ondes alpha. Les feuilles de Thé vert contiennent naturellement une substance appelée L-théanine. Malgré son nom, elle n'a aucun lien avec la théine et ne provoque aucune excitation, bien au contraire. La L-théanine régule la production d'ondes alpha : en situation d'effort intellectuel prolongé, elle est capable de diminuer leur production par le cerveau, ce qui favorise la mémorisation et la concentration. À l'inverse, si le cerveau se trouve en phase d'endormissement, elle stimule leur émission, d'où un effet relaxant propice au sommeil.

Théorie des signatures

La Théorie des Signatures était une méthode d'observation dans l'Antiquité, selon laquelle l'aspect des plantes était une indication de leurs bienfaits pour le corps. La science moderne a depuis confirmé l'efficacité de certaines plantes sur la partie du corps à laquelle elles ressemblent. Ainsi débarrassée de sa coque, la Noix ressemble fortement à un cerveau. Elle est riche en Omegas et en antioxydants, et plusieurs études ont montré ses bienfaits sur la mémoire.

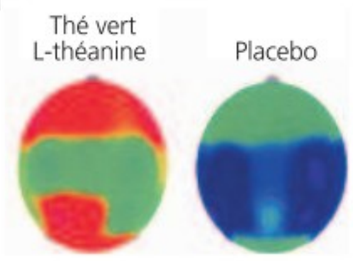
Indispensable irrigation

Le cerveau est incapable de constituer des réserves, et doit donc être alimenté en permanence en glucose. Celui-ci est apporté grâce à un vaste réseau de capillaires, de petits vaisseaux sanguins qui permettent d'irriguer efficacement l'ensemble du cerveau. Leurs fines parois laissent passer le glucose mais aussi l'oxygène indispensable au bon fonctionnement du cerveau. En effet, quelques minutes seulement sans oxygène y entraîne des lésions irréversibles. Là encore, l'alimentation et le mode de vie en général jouent un rôle primordial. La consommation d'aliments riches en antioxydants qui protègent les capillaires, et plus spécifiquement en polyphénols, influence directement le fonctionnement cérébral. Les recherches convergent notamment sur le Pin maritime, dont l'écorce renferme de grandes quantités de proanthocyanidines ou OPC, des polyphénols capables de stimuler la microcirculation sanguine dans les capillaires.

B comme bénéfiques

Le cerveau utilise aussi une multitude de vitamines et minéraux pour fonctionner. Un apport suffisant en vitamines B est particulièrement bénéfique pour maintenir des fonctions cognitives normales (mémoire, concentration, attention). La vitamine B5 par exemple est essentielle à la production de neurotransmetteurs, des substances chimiques qui permettent aux signaux électriques de passer d'un neurone à l'autre pour faire circuler l'information.

Le cerveau passé au scanner



L'activité cérébrale peut être observée grâce au scanner qui met en évidence les zones activées en fonction de l'état dans lequel se trouve le cerveau. La consommation de L-théanine (en rouge) active les zones de la mémoire et de la concentration. Sans L-théanine, ces zones restent inactives (en bleu). Les nombreux travaux de recherche effectués sur le fonctionnement du cerveau ont permis de mettre au point des solutions pour améliorer les fonctions cognitives et les performances intellectuelles. Le laboratoire de recherche végétale New Nordic a mis au point une formule complètement naturelle à base de plantes et vitamines. Baptisée **Cerveau Clair**, elle contient des extraits concentrés de Thé vert, de Noix, de Pin maritime et de Grenade, associés à des vitamines et de l'Iode pour optimiser les performances cérébrales. Ces actifs sont capables d'atteindre le cerveau en quelques heures et sont efficaces sur le long terme. Ils sont donc indiqués pour stimuler les capacités intellectuelles, la concentration et la mémoire, notamment en période de révisions ou d'examens, mais aussi pendant des programmes de plusieurs mois. Les actifs de **Cerveau Clair** atteignent rapidement le cerveau, pour une efficacité en moins d'une heure. Réservé aux adultes de plus de 15 ans.

Des conseils ?

Les experts New Nordic vous répondent au **01 85 42 32 11** ou sur **www.vitalco.com**

Disponible en pharmacie

Cerveau Clair 60 et 120 cp sont disponibles grâce aux codes **ACL 295 18 63** et **636 08 99**

AGNÈS IATZOURA - MNHN

Les ossements mis au jour ont permis d'identifier le dinosaure comme étant un « camarasaurus ».

Un nouveau sauropode en Charente

Ce dinosaure sauropode herbivore de grande taille a été découvert sur le site de fouilles d'Angeac-Charente. Il va être étudié au Muséum, à Paris.

Le voyage s'est déroulé sans encombre. Protégé dans un cocon de plâtre, l'amas d'argile, de sédiments et de restes de végétaux broyés forme une sorte d'œuf terreux pesant plus de deux tonnes. Il a été mis au jour sur le site de fouilles d'Angeac-Charente pour arriver, en novembre dernier, dans une salle de préparation du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. Il va y être méticuleusement nettoyé afin de mettre en lumière son précieux contenu : les os fossilisés d'une nouvelle espèce de dinosaure sauropode herbivore de grande taille, dont les premiers ossements ont été découverts cet été. *« Nous savons déjà qu'à l'intérieur de ce bloc, il y a des os du bassin, quatre vertèbres d'un mètre de large encore en connexion, et au moins deux côtes de plus de 2 mètres de long »*, détaille le paléontologue Ronan Allain.

Des proches parents en Amérique du Nord

En plus des os, 28 dents ont également été trouvées : leur forme très particulière, en spatule, a déjà permis de préciser le genre du dinosaure qui les portait. *« Il s'agit d'un* camarasaurus*, un animal assez robuste qui devait mesurer dans les 15 mètres de long, pour un poids de 20 à 25 tonnes »*, précise le spécialiste. Si ce sont déjà des dimensions impressionnantes, chez les sauropodes celui-là est plutôt de taille moyenne. D'ailleurs, l'autre gros dinosaure d'Angeac, découvert en 2010, mesurait quant à lui une trentaine de mètres de long pour 40 tonnes.

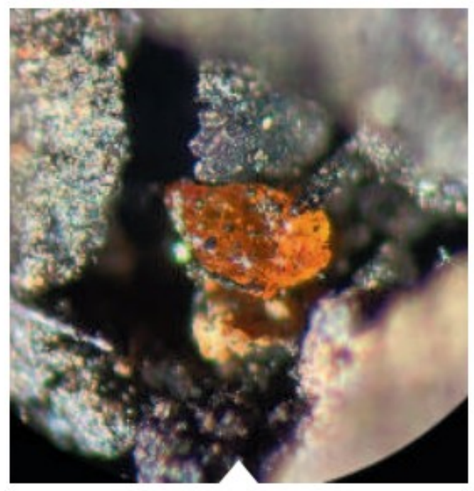
L'autre particularité de ce nouveau dinosaure est que ses plus proches parents connus vivaient en Amérique du Nord à la fin du jurassique, il y a 145 millions d'années. Soit un peu plus de 5 millions d'années avant les dinosaures du site d'Angeac, datés eux de 140 millions d'années, ce qui correspond au début du crétacé. C'est d'ailleurs une particularité de ce lieu : il présente un écosystème typique du jurassique conservé dans des sédiments bien plus récents. Comme si l'extinction qui marque la séparation entre ces deux périodes avait été plus douce à cet endroit. ■ **J. I.**

Le mammouth, plat préféré des anciens Amérindiens

ANTHROPOLOGIE

Il y a 13 000 ans, le régime alimentaire des ancêtres des Amérindiens sur le continent nord-américain était majoritairement constitué de viande de mammouth. Jusqu'à 40 %, selon une modélisation du régime alimentaire d'une mère à partir d'isotopes présents dans les os d'un nourrisson découvert sur un site funéraire Clovis dans le Montana (États-Unis). H. J.

SOURCE : JAMES CHATTERS, UNIVERSITÉ MCMASTER, CANADA.



ALFRED-WEGENER-INSTITUT / J.P. KLAGES

La résine fossilisée mesure à peine 70 micromètres.

On a trouvé un morceau d'ambre en Antarctique

PALÉOCLIMATOLOGIE

Un minuscule fragment d'ambre d'à peine 70 micromètres a été déniché dans une carotte sédimentaire prélevée à côté du glacier de l'île des Pins, en Antarctique. Daté de 90 millions d'années, ce morceau de résine fossilisée atteste des conditions chaudes qui régnaient à cette époque sur tout le globe, y compris aux Pôles. L'ambre de l'île des Pins pourrait contenir des spores, des restes de plantes, voire des traces d'insectes. **J. I.**

SOURCE : JOHANN KLAGES, UNIVERSITÉ DE BRÊME, ALLEMAGNE.

SCIENCES ET AVENIR
LES DOSSIERS

LES DOSSIERS SCIENCES ET AVENIR

DE LA PRÉVENTION AUX SOINS

Le guide de la santé

Alimentation • Sommeil
Activité physique • Dépistage
Télémédecine • Automédication
Bilans • Vaccins...

ARNAUD MEYER/LEEXTRA POUR SCIENCES ET AVENIR

« Les progrès de la médecine ne cessent de s'accélérer. Nous vivons une révolution qui donne le vertige »

Jean-Pierre Thierry, médecin de santé publique

SE SOIGNER : LES BONS RÉFLEXES À TOUS LES ÂGES

en vente en kiosque

À Pompéi, la génétique réécrit l'histoire

Les analyses d'ADN ancien réalisées sur 14 victimes de l'éruption du Vésuve battent en brèche les conclusions des chercheurs.

ALAMY/PHOTO12

Le moulage nommé « La mère et l'enfant » a livré un secret inattendu.

De nouvelles techniques d'analyse génétique viennent d'ébranler certaines des interprétations faites depuis le XIXe siècle sur les moulages des victimes de Pompéi. Ainsi de celui nommé « La mère et l'enfant », donnant à voir le dernier instant d'un adulte sur le dos, bras relevés au niveau du visage, un enfant assis sur lui. L'ADN ancien extrait des restes squelettiques par une équipe de l'université Harvard (États-Unis) et de l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutive (Allemagne) a révélé qu'il s'agissait en fait d'un homme et d'un enfant sans aucun lien de parenté. *Idem* pour les corps d'un autre adulte et d'un autre enfant trouvés à proximité, dont on n'a relevé aucun lien génétique. Les prélèvements réalisés sur 14 des 86 moulages actuellement en restauration révèlent par ailleurs une grande diversité génétique, issue pour une large part d'immigrants de l'est de la Méditerranée. Une illustration du caractère cosmopolite de Pompéi. **J. I.**

AKG

Un possible galion de Vasco de Gama retrouvé

ARCHÉOLOGIE Une épave localisée en 2003 sur le récif de Ngomeni, au large du Kenya, pourrait être celle d'un galion de Vasco de Gama (vers 1460-1524). Il s'agirait du *São Jorge*, coulé en 1524, qui comptait parmi les 20 navires partis avec l'explorateur portugais lors de son ultime voyage vers les Indes. **M. B.**

SOURCE : FILIPE CASTRO, UNIVERSITÉ DE COIMBRA, PORTUGAL.

Les anciens Égyptiens buvaient des cocktails hallucinatoires

CHIMIE Des analyses chimiques avancées ont identifié pour la première fois des traces de substances hallucinogènes sur une tasse égyptienne figurant Bès, un dieu vénéré pour la fertilité et la guérison médicinale. Datée du IIe siècle avant notre ère, la tasse était peut-être utilisée pour un rituel autour de l'accouchement. Le cocktail psychédélique était aromatisé avec du miel, du sésame, des pignons, de la réglisse et du raisin. **H. J.**

SOURCE : DAVIDE TANASI, UNIVERSITÉ DE FLORIDE DU SUD, ÉTATS-UNIS.

TAMPA MUSEUM OF ART, FLORIDA

La tasse sculptée contient des résidus de substances psychoactives.

Le chaton à dents de sabre

PALÉONTOLOGIE

Le corps momifié d'un tigre à dents de sabre de 3 semaines (*Homotherium latidens*) a été retrouvé dans la glace en Sibérie. Vieux de 37 000 ans, les restes révèlent qu'il possédait un os prémaxillaire élargi. Il s'agit du premier mammifère éteint sans analogue dans la faune moderne à être étudié, et de la première preuve de sa présence en Asie pendant le pléistocène tardif. J. de C.

SOURCE : ALEXEI LOPATIN, ACADÉMIE DES SCIENCES DE RUSSIE.

Un chaînon manquant dinosaure-oiseau

PALÉO-ORNITHOLOGIE *Navaornis hestiae* vivait il y a 80 millions d'années au Brésil, dans un terrain désertique sillonné de petits cours d'eau. L'analyse du fossile exceptionnellement préservé indique qu'il se situe, sur l'arbre évolutif, entre les premiers oiseaux comme archéoptéryx et les oiseaux actuels. **J. I.**

SOURCE : LUIS CHIAPPE, MNH DE LOS ANGELES, ÉTATS-UNIS.

Le fossile très bien conservé de cette nouvelle espèce du crétacé révèle de précieux détails.

STEPHANIE ABRAMOWICZ

Des empreintes de dinosaures dans les Alpes italiennes

PALÉONTOLOGIE À l'occasion d'une randonnée dans les Alpes du nord de l'Italie, un couple a découvert par hasard l'empreinte fossile d'un reptile (*Dromopus*) vieux de 280 millions d'années. Alertés, des chercheurs ont cartographié la zone et identifié des centaines d'autres empreintes de tétrapodes et d'invertébrés, révélant des détails remarquables tels que des empreintes d'ongles, ainsi que la texture de la peau du ventre de certains animaux. **J. de C.**

SOURCE : CRISTIANO DAL SASSO, MUSÉE D'HISTOIRE NATURELLE DE MILAN, ITALIE.

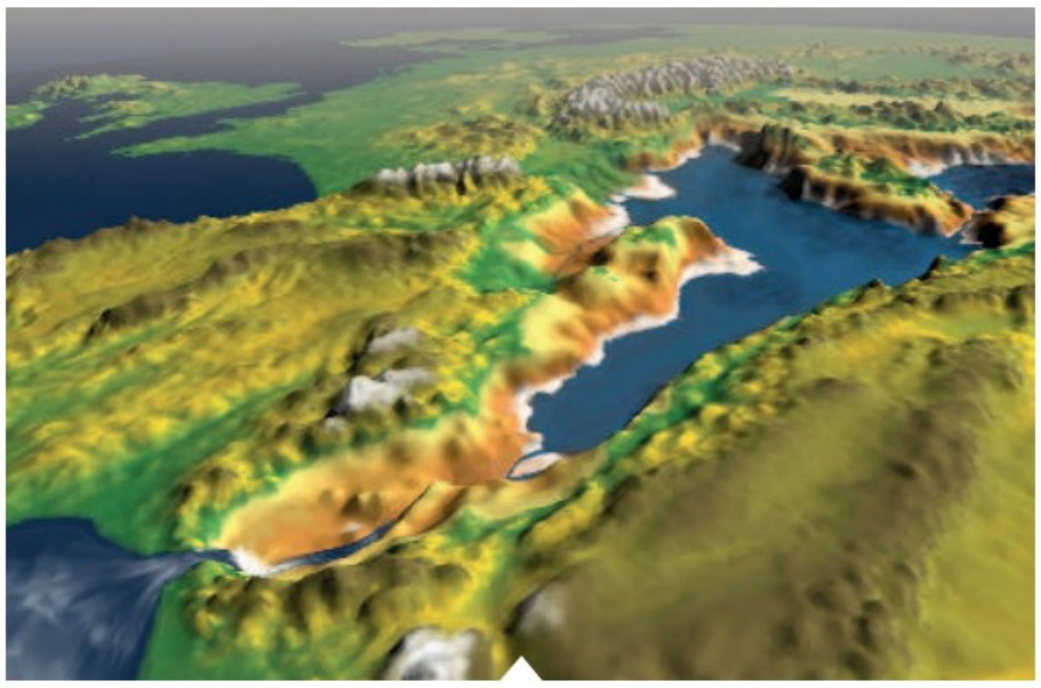
M. BESSOU/ CNRS

Le crâne a été soigneusement scié selon la procédure d'embaumement.

Ces nobles périgourdins embaumaient leurs défunts

ARCHÉOLOGIE Les restes de sept adultes et cinq enfants mis au jour dans une crypte du château des Milandes, près de Sarlat-la-Canéda (Dordogne), ont révélé un cas unique d'embaumement en France. Durant les XVIe et XVIIe siècles, la famille de Caumont a fait éviscérer et embaumer ses morts, une tradition familiale que l'on ne connaissait jusqu'ici en Europe que chez les Médicis. **S. de L.**

SOURCE : CAROLINE PARTIOT, ACADÉMIE AUTRICHIENNE DES SCIENCES.



PIBERNAT & GARCIA-CASTELLANOS

Le détroit de Gibraltar à la fin de la période d'assèchement et de salinité de la grande bleue, il y a un peu plus de 5 millions d'années.

Quand la Méditerranée se refermait

PALÉOCLIMATOLOGIE Un nouveau scénario explique l'origine de l'immense gisement de sel de 3 kilomètres d'épaisseur et d'un million de kilomètres cubes, formé dans la mer Méditerranée il y a 6 millions d'années. Ce géant salifère s'est formé à la suite de la fermeture progressive du détroit de Gibraltar qui a provoqué une augmentation de la salinité — multipliée par dix — et l'assèchement de la Méditerranée. **A. R.**

SOURCE : GIOVANNI ALOISI, UNIVERSITÉ PARIS CITÉ, FRANCE.

GLOBE INSTITUTE, UNIVERSITY OF COPENHAGEN ; KELSEY WILLIAMSON ; AFP ; NASA/SDO

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr

PALÉOGÉNOMIQUE

L'ADN environnemental pour reconstituer les écosystèmes passés

Figure emblématique de la paléogénétique, Eske Willerslev a séquencé le premier génome humain ancien. Désormais, il cherche les traces d'ADN directement dans des sédiments anciens dans l'espoir de reconstituer les écosystèmes du passé. Un entretien exclusif à lire sur le site de *La Recherche* : **https://bit.ly/935palad**

QUOTIDIEN

L'actu des sciences en ultrabrèves

Chaque jour, dès 17 heures, retrouvez sur le site de *Sciences et Avenir* les immanquables de l'actualité scientifique en format ultracourt : **sciav.fr/935bref**

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

2 minutes

Des orques à l'assaut du requin-baleine

Dans le golfe de Californie, aux États-Unis, une bande d'épaulards a été filmée pour la première fois en pleine attaque coordonnée du plus gros poisson du monde. **sciav.fr/935orque**

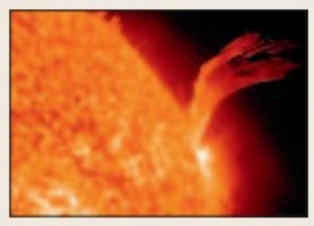
5 minutes

Aux origines de l'effet yo-yo

Des chercheurs ont identifié des cellules qui gardent la mémoire de l'ancien surpoids, expliquant ainsi pourquoi la reprise de poids est si fréquente après un régime. **sciav.fr/935yoyo**

10 minutes

Une tempête solaire de 2700 ans



L'analyse de cernes d'arbres a permis de dater précisément un « événement de Miyake », véritable tempête de particules énergétiques frappant la Terre. **sciav.fr/935soleil**

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

SPÉCIAL iA

Ce que l'intelligence artificielle change

Depuis l'arrivée de ChatGPT, l'intelligence artificielle redéfinit les usages du texte, de l'image, du son et de la vidéo. Autrefois réservée aux professionnels, elle s'intègre désormais aux outils du quotidien. Mais les interrogations restent nombreuses : comment éviter l'effet « boîte noire » ? quel est son coût énergétique ? de quelle manière traquer les « deepfakes » ? C'est ce que dévoile ce dossier qui se poursuit tout au long des rubriques de votre mensuel par une revue détaillée des acquis scientifiques de l'IA et des promesses dont elle est porteuse.

Dossier réalisé par
Arnaud Devillard, Gérald Holubowicz, Olivier Lascar, Erwan Lecomte, Kirill Nikitine

CONTEXTE
La plus rapide des révolutions scientifiques p. 26

GUIDE
Les meilleures IA à adopter p. 30

RECHERCHE
Trois initiatives pour plus d'éthique et de fiabilité p. 34

DÉRIVES
Deepfakes, la réalité alternative p. 36

ENVIRONNEMENT
Un véritable gouffre énergétique p. 39

NADIA RABHI POUR SCIENCES ET AVENIR

MISTRAL AI_

Quels sont les principaux points à retenir?

DALL·E

Midjourney

Traduis-moi ce texte en anglais

LLaMA by Meta

Gemini

Comment ce texte peut-il être amélioré pour être plus clair?

stability.ai

RÉSEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS. Modèle mathématique inspiré du cerveau humain. Il est constitué de plusieurs couches de traitement des informations qu'on lui soumet avant de produire un résultat (prédiction).

HALLUCINATION. Contenu erroné, complètement inventé, voire bizarre, produit par une IA générative. C'est l'équivalent d'un bug qu'on ne sait pas expliquer. Le terme est discutable, tant il anthropomorphise l'IA.

GRAND MODÈLE DE LANGAGE (LLM). Algorithme entraîné sur un grand nombre de données pour traiter et générer du texte en langage naturel. Il s'appuie sur une architecture de réseaux de neurones appelée transformeur.

La plus rapide des révolutions scientifiques

Si l'intelligence artificielle a déjà une longue histoire, l'arrivée de ChatGPT il y a deux ans a démocratisé ces nouveaux outils d'IA générative avec des interfaces simples et intuitives. Retour sur les dessous de ces innovations de rupture.

Ce jeudi 7 novembre 2024, Xavier Niel ouvre la deuxième édition de l'événement ai-Pulse, à la Station F à Paris, en discutant avec Moshi. On ne présente plus Xavier Niel, fondateur du groupe de télécommunications Iliad, maison mère de l'opérateur Free. C'est sa filiale en hébergement et *cloud computing* Scaleway qui organise ce cycle de conférences et d'ateliers consacré à l'intelligence artificielle (IA). Moshi est moins connue : c'est une IA vocale apparue en juillet dernier et développée par le laboratoire de recherche Kyutai. Et ce matin, Moshi a un petit problème. « *Désolé, je ne vous comprends pas, je ne parle qu'anglais* », lance l'interface visible sur écran géant à Xavier Niel… qui vient pourtant de s'exprimer dans cette langue ! Rires dans la salle. « *OK. Je vais te laisser avec des gens qui maîtrisent l'anglais mieux que moi alors* », répond le fondateur d'Iliad. « *Oui, ce sera plus agréable pour nos oreilles* », conclut Moshi, sans pitié.

Pour amusante qu'elle soit, cette démonstration est parfaitement dans l'air du temps. Depuis plus de deux ans et l'arrivée de ChatGPT d'OpenAI à l'automne 2022, l'intelligence artificielle générative, et particulièrement les modèles de langage, incarne l'IA. Dans les discours, dans les médias, dans les annonces. « *Pour le grand public, s'est ancrée l'idée qu'il y a un avant et un après ChatGPT,* reconnaît Joseph Salmon, spécialiste d'apprentissage automatique à l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria), à Montpellier. *D'autant qu'en matière de technologies, on a tendance à vouloir désigner des moments de rupture.* »

La réalité est plus nuancée. Si révolution il y a, elle se trouve surtout dans les usages. ChatGPT est une interface très simple, intuitive, qui n'exige aucune maîtrise technique. On tape du texte comme on a l'habitude de le faire dans un moteur de recherche. Bilan : deux mois après sa mise à disposition sur Internet, ChatGPT comptait 100 millions d'utilisateurs actifs. Quantité d'interfaces concurrentes ont suivi (dont Gemini de Google), aujourd'hui intégrées dans des outils existants (bureautique, graphisme, moteurs de recherche…). Elles

YASSINE MAHJOUB/SIPA

L'agent conversationnel ChatGPT d'OpenAI, lancé par Sam Altman (photo) en novembre 2022, est devenu l'incarnation de l'intelligence artificielle. Aujourd'hui, il compte plus de 200 millions d'utilisateurs hebdomadaires.

sont capables de traiter et générer du texte, de l'image, de la vidéo, de la voix, avec une qualité inédite et un réalisme troublant. « *À titre de comparaison, après l'arrivée de l'Internet grand public, il a fallu dix ans pour voir de vrais changements dans les usages et les services* », a estimé Michael Dell, P-DG de Dell Technologies, qui intervenait à ai-Pulse. Directrice du Paris AI Research Institute (institut Prairie), Isabelle Ryl va plus loin : « *Jamais, dans l'histoire de la recherche scientifique, la vitesse de transfert n'a été aussi rapide,* notait-elle en avril dernier dans *La Recherche* (n° 577). *On voit des chercheurs présenter leurs travaux au Siggraph* [conférence internationale en imagerie informatique et technologies interactives] *et déposer la même année un brevet sur le sujet tel qu'il a été présenté, puis créer une start-up douze mois plus tard.* »

L'IA générative a eu plusieurs incarnations

Le laboratoire Kyutai est un bel exemple de ce cycle accéléré. Dévoilée lors de la première édition d'ai-Pulse en novembre 2023, cette structure privée à but non lucratif avait annoncé que son premier chantier serait le développement d'un modèle de langage multimodal (traitement simultané de données textuelles, vocales, d'images). Huit mois plus tard arrivait Moshi, dont le code est à disposition, en *open source*. Mais cette effervescence repose sur une longue évolution. L'intelligence artificielle générative a eu plusieurs incarnations avant que n'apparaissent les interfaces à base d'instructions textuelles comme ChatGPT ou Dall-E. Inventée en 2014 par un chercheur de l'université de Montréal (Canada), la méthode des réseaux génératifs antagonistes a produit les premiers *deepfakes (lire p. 36)* et tout un emballement autour de l'IA artistique. En 2015, le programme DeepDream de Google transformait automatiquement des images existantes (tableaux, photos) en visions hallucinées. Et l'IA générative n'est qu'un aspect de ce que l'on appelle l'intelligence artificielle statistique, celle des réseaux de neurones. Laquelle coexiste avec une autre branche : l'IA symbolique. Cette dernière consiste à

coder les règles de fonctionnement et le comportement d'un algorithme, de programmer explicitement, en somme, un raisonnement (l'ordinateur Deep Blue, qui a battu Garry Kasparov aux échecs en 1997, était de l'IA symbolique). Ce qui permet de comprendre comment un résultat a été obtenu, notamment s'il est erroné.

En IA statistique, un algorithme d'apprentissage est entraîné sur un corpus de données dont il analyse les caractéristiques et tire de lui-même des régularités. Une fois cet algorithme testé et validé, il utilise ce qu'il a appris pour traiter des données similaires mais sur lesquelles il n'a pas été entraîné. Il pourra, par exemple, reconnaître un objet, une voix, un visage, identifier une tumeur. Mais il a besoin de milliers d'exemples pour y arriver, là où quelques-uns suffisent à un être humain. Une utilisation pionnière de ce type d'algorithme remonte aux années 1990 : la reconnaissance des chiffres manuscrits sur les chèques de banque. « *Quand j'ai découvert les réseaux de neurones au début des années 2000, ils étaient jugés désuets,* se rappelle Joseph Salmon. *Ces architectures étaient difficiles à manipuler, c'était fastidieux et les gens qui s'y aventuraient n'allaient pas vers des architectures très profondes, qui ont aujourd'hui montré leur efficacité.* »

JOSEPH SALMON

« Quand j'ai découvert les réseaux de neurones au début des années 2000, ils étaient jugés désuets »

Joseph Salmon, spécialiste d'apprentissage automatique à l'Inria, à Montpellier

Des probabilités qui servent d'aide à la décision

L'IA statistique a décollé grâce à l'usage de processeurs électroniques initialement développés pour les rendus graphiques, les GPU, combiné à l'accès à quantité de données à la faveur d'Internet. Comme l'a résumé Michael Dell lors de son intervention à ai-Pulse : « *Partout où il y a des données, il y aura de l'IA pour améliorer les résultats.* » Les modèles de langage en sont l'exemple exacerbé. ChatGPT, Gemini, Llama de Facebook ou Claude d'Anthropic sont loin d'être les premiers *chatbots* de l'histoire, mais la qualité de l'expression et la fluidité des interactions sont sans commune mesure avec ce qui se faisait avant.

Les résultats fournis par une IA statistique ne sont en réalité que des probabilités et ne peuvent servir que d'aide à la décision. Une vérification *a posteriori* s'impose. Un algorithme de traduction remplace des mots rédigés dans une langue par les mots d'une autre langue calculés comme les plus probables, et non en se basant sur leur sens. Autre conséquence de l'entraînement à partir de données : la spécialisation. Une IA capable de battre le meilleur joueur de go au monde comme AlphaGo (de Google DeepMind) en 2016 est inca-

CALCUL

Une course au gigantisme

Les grands modèles de langage (ou LLM) doivent leur appellation au volume de leur corpus de données d'entraînement et à leur nombre de paramètres. Ces derniers correspondent aux connexions entre les neurones du modèle. Chacun a une valeur qui détermine l'importance qu'aura la caractéristique d'une donnée dans l'apprentissage. En la matière, la surenchère est de mise dans l'IA générative actuelle. Le modèle *open source* Bloom compte 176 milliards de paramètres, une version de Llama 3-1 va jusqu'à 405 milliards et GPT-4o en aurait 1800 milliards. Ce type d'architecture nécessite des capacités de calcul faramineuses, avec des conséquences qui inquiètent en matière de consommation d'énergie (*lire p. 39*) et de bilan carbone. Certains tentent néanmoins d'aller à rebours de cette tendance, sans nuire aux aptitudes des algorithmes. Le centre de recherche français Inria mène ainsi des recherches en IA dite frugale, économe en données et en ressources. C'est aussi l'un des credo de Kyutai, qui ambitionne de faire tourner Moshi sur un ordinateur personnel, sans faire appel au *cloud* (traitement sur des serveurs distants). « *Il existe en ce moment une course à l'armement qui n'est pas forcément justifiée* », estime son directeur Patrick Perez. Lors de la conférence ai-Pulse, le directeur général de Scaleway Damien Lucas a estimé qu'il vaudrait mieux mutualiser les capacités de calcul en Europe, afin de proposer une « *infrastructure élastique* », conforme aux besoins de chaque utilisateur, au lieu de surdimensionner les *data centers* en processeurs graphiques (GPU).

XAVIER POPY / REA

L'IA vocale Moshi, développée par le laboratoire français Kyutai, réagit en temps réel (ici lors sa présentation le 3 juillet 2024 à Paris).

pable de piloter une voiture autonome. Les réseaux de neurones posent d'autres problèmes. Ils sont tellement complexes qu'il est très difficile, voire impossible — même pour ceux qui les ont conçus —, de savoir comment ils aboutissent à leurs résultats. Ce phénomène souvent qualifié de « boîte noire » est un vrai défi à l'intégration de ces technologies dans des systèmes critiques (sécurité, industrie). Au point qu'un champ de recherche à part entière se développe autour des notions d'IA de confiance et d'explicabilité. Là encore, les modèles de langage fournissent une illustration extrême avec leurs « hallucinations » : des résultats aberrants difficilement explicables, mais que l'IA génère parce que sa logique statistique lui impose de produire quelque chose.

Extrêmement dépendants des données, ces algorithmes sont aussi exposés à des biais. Les corpus d'entraînement ne sont en effet jamais neutres, car constitués par des humains en fonction de quantité de critères (culturels, linguistiques…) et reflètent des phénomènes latents (racisme, misogynie). Avec pour conséquence la surpondération de certaines caractéristiques, au risque de fausser ses résultats. Cas typique : un algorithme de recrutement abandonné par Amazon en 2017 parce qu'il privilégiait les hommes aux postes techniques. Ou les biais pénalisant les Noirs dans un outil d'aide à l'évaluation du risque de récidive aux États-Unis. Il est toujours possible de corriger le tir en créant un corpus d'entraînement plus équilibré *(lire p. 34)*, mais il est prouvé que réduire un biais en fait surgir d'autres… Enfin, pour une tâche donnée, l'IA statistique a du mal à traiter et analyser des cas atypiques car, par définition, il n'y a pas eu assez d'exemples dans son corpus d'entraînement. C'est un problème notoire notamment en matière de diagnostic médical *(lire p. 66)*.

Garder la tête froide face à la machine

Ces limites sont connues, bien identifiées et font l'objet de nombre de recherches. Paradoxalement, elles ne constituent pas le fond du problème de cette intelligence artificielle qui a malgré tout montré combien elle pouvait être performante là où d'autres approches peinaient. La question soulevée par ces technologies, particulièrement avec l'IA générative, est celle des rapports que nous entretenons avec elles. Voire la fascination qu'elles exercent sur nous, au point que nous en ayons une confiance aveugle. Là réside peut-être le véritable grand chantier de l'IA : que l'humain garde la tête froide face à la machine. ■ **A. D.**

DISTINCTIONS

Consécration pour les réseaux de neurones

L'informatique n'est pas une discipline distinguée par les prix Nobel mais a les honneurs du prix Turing. Le 27 mars 2018, il a été attribué à Yann LeCun, Yoshua Bengio et Geoffrey Hinton pour leurs travaux sur l'apprentissage profond, sources des avancées fulgurantes actuelles en IA. Des avancées telles que deux chercheurs du domaine ont quand même fini par recevoir le prix Nobel de physique en 2024 : le biophysicien John Hopfield et, à nouveau, l'informaticien Geoffrey Hinton.
Le premier a présenté en 1982 un réseau de neurones artificiels pionnier, qui porte son nom. Le second a fait décoller, au milieu des années 1980, une méthode d'entraînement pour réseau de neurones, la rétropropagation du gradient.
En 2012, Geoffrey Hinton et deux de ses étudiants à l'université de Toronto (Canada), Alex Krizhevsky et Ilya Sutskever (futur développeur de ChatGPT), ont fait sensation avec cette méthode au concours de vision par ordinateur ImageNet, inaugurant les grandes heures de l'IA statistique.

Texte, image, vidéo... les meilleures IA à adopter

En quelques mots judicieusement choisis, l'intelligence artificielle conçoit une image complexe, un texte structuré ou une musique immersive. Mais loin de se limiter aux métiers créatifs, l'IA générative transforme aussi d'autres secteurs professionnels. Revue de détail des solutions actuelles.

L'intelligence artificielle (IA) générative n'est plus une curiosité. Elle redéfinit les usages du texte, de l'image, du son et de la vidéo. Autrefois réservée aux professionnels, l'IA s'intègre désormais aux outils du quotidien, où Microsoft, Google, Adobe et des acteurs comme Anthropic et le français Mistral rivalisent pour radicalement transformer les usages. Un changement à la fois technique et culturel. La force de l'IA générative ? Une capacité inégalée à rapidement synthétiser des informations et à produire des contenus riches à partir d'instructions simples, les fameux *prompts*. En quelques mots judicieusement choisis, l'utilisateur génère une image complexe, un texte structuré ou une musique immersive. Une prise en main intuitive, grandement facilitée par le design épuré des plateformes, qui élargit l'horizon des possibles pour les créateurs, mais pose aussi des défis : comment choisir les bons outils pour des besoins spécifiques ? Quels écosystèmes privilégier ?

Les géants de la tech comme Google, Microsoft ou Adobe ont saisi le potentiel de l'IA générative pour leurs applications. Depuis quelques mois, leurs IA ne sont pas que de simples outils isolés, mais deviennent des fonctionnalités centrales de leurs écosystèmes. Copilot est désormais un incontournable des outils Microsoft, optimisant la productivité dans Office, tandis que Gemini, l'offre phare de Google, complète la suite de Google Drive en musclant Google Docs et Google Sheet.

GETTY IMAGES

COMPARATIF

Cinq IA génératives grand public

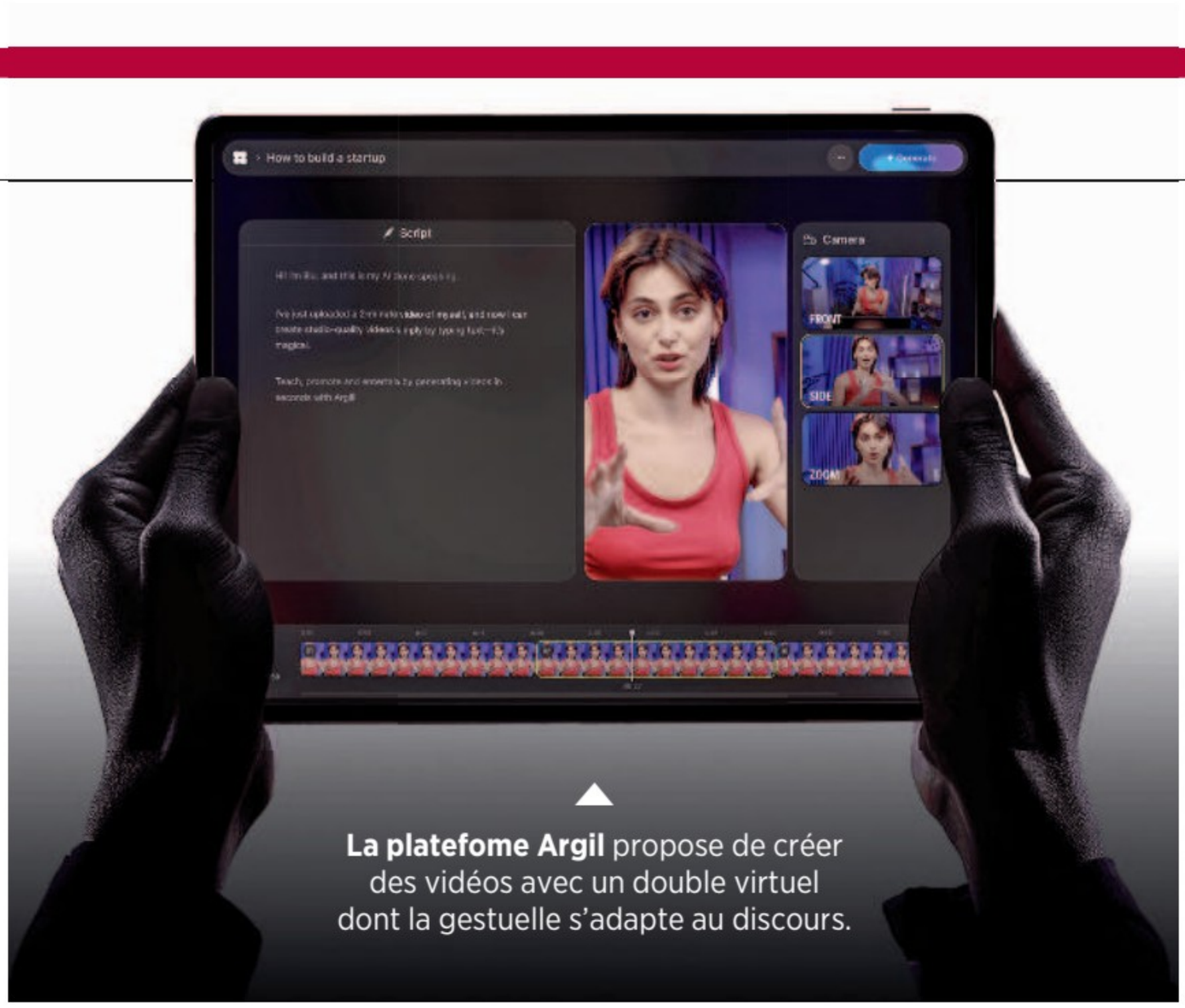
ChatGPT OpenAI	Gemini Google	Claude Anthropic	Mistral Mistral AI	Llama Meta
20 €/mois	**21,99 €/mois**	**22 €/mois**	**Gratuit**	**Gratuit**
ChatGPT dans ses versions GPT-4o et 4o-mini reste un pilier de l'IA générative. Il excelle dans la création de textes, d'images et d'analyses complexes, notamment avec le modèle o1-preview et o1-mini, et s'intègre aux interfaces professionnelles grâce à son API (interface de programmation d'application). Sa version gratuite est idéale pour débuter. La version sur abonnement permet notamment de gérer des équipes d'utilisateurs et de créer des GPT, les automatisations personnalisées propres à ChatGPT.	Fusionnant IA générative et moteur de recherche, Gemini se positionne comme une plateforme tout-en-un. Intégré aux services Google Drive, il fournit des réponses pertinentes et contextualisées tout en automatisant certaines tâches. Idéal pour les utilisateurs déjà ancrés dans l'écosystème Google, Gemini résume vos mails, suggère des réponses, permet de créer des Gems (l'équivalent des GPT) et vous aide à coder. Intégré à Notebook LM, il en fait un puissant outil d'analyse de documents.	Claude 3.5 se distingue par sa sécurité et sa gestion plus nuancée des conversations. Il offre des résultats précis tout en garantissant une éthique renforcée dans ses interactions. Moins généraliste que ChatGPT, il excelle dans la recherche d'informations contextuelles et l'assistance personnalisée. Anthropic a même doté Claude 3.5 de fonctionnalités innovantes, comme des agents automatisés capables de prendre le contrôle de votre ordinateur pour réaliser des tâches très complexes.	Mistral, fleuron de la tech française, mise sur l'*open source* et l'innovation *(lire p.34)*. Avec des modèles légers et personnalisables, il répond aux besoins des développeurs et scientifiques cherchant une alternative flexible aux solutions propriétaires. Les modèles Mistral Large et Large 2, déjà très puissants, sont désormais complétés par un modèle aussi puissant que GPT-4, le Pixtral 12B, et multimodal, capable de générer des images.	Développé par Meta, Llama 3.1 se concentre comme Mistral sur l'*open source* pour fournir des outils accessibles et puissants. Flexible et conçu pour des applications variées, il attire les développeurs et entreprises grâce à son intégration facile dans divers systèmes internes. Option aussi puissante que GPT-4, Llama permet de personnaliser et d'améliorer le modèle en fonction de besoins spécifiques, facilitant ainsi la création d'applications et de solutions innovantes.

Adobe, quant à lui, intègre des fonctionnalités de retouche et d'aide à la création à ses produits phares, comme Photoshop, Lightroom ou Premiere, rendant l'IA indispensable à de nombreux professionnels. Ces intégrations accélèrent les tâches les plus complexes, facilitent l'utilisation de fonctionnalités expertes et améliorent les rendus. Mais cette concentration dans un même écosystème limite les choix, surtout pour les adeptes de solutions spécialisées.

Une évolution vers des systèmes intelligents autonomes

Quelques outsiders parviennent néanmoins à tirer leur épingle du jeu. Midjourney, Runway ou Perplexity offrent des solutions spécifiques et souvent plus pointues que leurs homologues intégrés. Ces outils s'adressent à des créateurs cherchant une personnalisation accrue ou à des entreprises voulant éviter les écosystèmes fermés. Dans le cas de la génération d'images, des solutions comme Midjourney ou Leonardo permettent de créer des visuels uniques grâce à une interface adaptée aux besoins des créateurs. Un véritable bond d'expérience, quand on sait que les premiers pas de Midjourney se sont faits dans le logiciel de messagerie Discord, complètement inadapté à la conception graphique. Dans la vidéo, des plateformes comme Pika Labs ou Runway ML ouvrent la voie à une production simplifiée, transformant le moindre texte en animations saisissantes.

Mais tout n'est pas forcément rose du côté des plateformes indépendantes. Contrairement aux outils des grands acteurs de la tech, ces solutions fragmentées manquent parfois d'intégration. Les utilisateurs doivent jongler entre plusieurs interfaces et différents abonnements, et ce bricolage d'écosystème peut en rebuter plus d'un. À long terme, la pérennité de ces acteurs indépendants reste également incertaine face à la puissance financière et technologique des géants qui peuvent décider de racheter tel ou tel service, comme c'est souvent le cas chez Apple.



La platefome Argil propose de créer des vidéos avec un double virtuel dont la gestuelle s'adapte au discours.

ARGIL

Si l'IA générative évolue rapidement, elle ne suit pas pour autant une trajectoire chaotique. Les outils comme ChatGPT, Copilot ou Gemini tendent vers une automatisation complète avec l'utilisation d'agents, c'est-à-dire de systèmes intelligents autonomes qui effectuent des tâches spécifiques sans intervention humaine, ce qui est déjà une réalité pour les utilisateurs de Claude.

Loin de se limiter aux métiers créatifs, l'IA générative transforme aussi d'autres secteurs. Dans la recherche d'information, par exemple, des moteurs comme GPT Search redéfinissent les standards en offrant des réponses personnalisées et pertinentes en un instant (*lire l'encadré*). Les assistants virtuels, qu'ils soient textuels ou visuels, s'intègrent dans des stratégies de gestion client, améliorant à la fois l'expérience utilisateur et la productivité des entreprises. Ces innovations changent notre manière de produire, de consommer et d'interagir avec l'information. De simples utilisateurs passifs, nous devenons acteurs d'un écosystème où la créativité est à la portée de tous. ■

IMAGE

Des visuels personnalisés à partir de simples « prompts »

Créer des images en quelques secondes sans pinceaux ni logiciels complexes : l'intelligence artificielle générative a rendu cette utopie créative accessible. Des outils comme Midjourney, Stable Diffusion, Leonardo ou le dernier venu Flux redéfinissent les contours de la créativité en permettant aux utilisateurs de créer des visuels personnalisés à partir de simples *prompts*. Une opportunité pour les artistes amateurs d'explorer de nouvelles esthétiques ou de concevoir des projets sophistiqués, autrefois réservés à des professionnels expérimentés. Un dilemme pour les artistes et designers qui peuvent exploiter la puissance de ces modèles de diffusion pour repousser les limites de leur art, mais dont les œuvres ont souvent servi à l'entraînement des modèles, sans qu'ils n'aient jamais perçu la moindre compensation financière.

Chacune de ces plateformes a ses forces : **Midjourney**, qui bénéficie désormais d'une nouvelle interface, excelle dans l'art numérique en proposant des créations visuelles au-dessus du lot. **Leonardo**, avec sa précision, séduit pour des réalisations sur-mesure adaptées à des secteurs comme le design ou les jeux vidéo. **Flux** (*open source*), mise, lui, sur l'adaptabilité des styles, attirant aussi bien les créateurs individuels que les industries cherchant des solutions innovantes. Les modèles de diffusion comme DallE-3 ou Stable Diffusion perdent du terrain après avoir longtemps été considérés comme des leaders dans le secteur. **Imagen 3**, disponible dans Gemini, fournit quant à lui une solution pratique pour le grand public.

SON / AVATAR

Un double virtuel hyperréaliste

Qui n'a pas rêvé d'avoir un double qui puisse assister aux interminables réunions zoom des après-midi de télétravail ? Les plateformes de création d'avatars et de voix synthétiques ne sont pas loin de nous proposer ce type d'options. Synthesia, Heygen ou le français Argil conçoivent des plateformes faciles à prendre en main pour créer des doubles virtuels. Le rendu des vidéos a opéré un bond spectaculaire en l'espace de quelques mois et propose désormais des avatars en mouvement capables de s'insérer dans n'importe quel environnement s'ils sont filmés sur fond vert.

Toutes les plateformes offrent différents modèles préenregistrés, jusqu'à 300 pour **Heygen**, contre 140 pour **Synthesia**, et permettent d'exporter de la vidéo en haute qualité jusqu'à 4K. Elles autorisent l'importation de fichiers audio pour synchroniser la vidéo avec une voix naturelle enregistrée, ou avec une voix synthétique générée par une plateforme spécialisée, comme ElevenLabs, la référence du marché. **Argil** propose de son côté de contrôler son langage corporel dans un éditeur adapté, qui permet d'adapter le discours aux mouvements du corps pour un rendu encore plus naturel. Point clef de ces plateformes : la sécurité. Pour enregistrer un avatar personnalisé, des systèmes de vérification empêchent l'usurpation d'identité, contrairement à ElevenLabs, qui permet de cloner n'importe quelle voix sans vérification particulière.

VIDÉO / MUSIQUE

La création multimédia sans limites

Réaliser une vidéo en quelques minutes, ou composer une musique en quelques clics. L'intelligence artificielle générative transforme ces tâches autrefois complexes en processus accessibles, redéfinissant ainsi les horizons de la création multimédia. Des outils tels que Runway ML, Kling AI, Minimax, Sora d'OpenAI, Pika, Veo de Google, Dream Machine de Luma Labs AI pour la vidéo, ou Suno, Udio, Soundraw, Loudly ou le plus éthique beatoven.ai pour la musique, ouvrent de nouvelles perspectives pour les vidéastes et musiciens amateurs comme pour les professionnels.

Dans la création vidéo, Runway ML et Kling AI se démarquent, même si leur suprématie est contestée. **Sora**, en développement, montre déjà des résultats impressionnants avec une version test sur Hugging Face. Pour séduire les professionnels, ces outils misent sur un contrôle précis des paramètres. **Runway Gen-3** et **Kling** innovent avec des fonctionnalités comme le *motion brush*, qui permet d'animer des zones spécifiques et de simuler des mouvements de caméra. Luma Labs, avec son système d'images clés, offre une finesse d'ajustement idéale pour des animations complexes. Kling se distingue par son rapport qualité-prix et la génération de vidéos de haute résolution, malgré des performances variables en cas de surcharge des serveurs. À l'inverse, **Minimax** excelle dans l'adhérence parfaite aux *prompts* et les mouvements réalistes, mais ses options limitées trahissent le caractère expérimental de ces technologies face aux outils traditionnels.

Du côté de la musique, Suno, Udio, Loudly et Soundraw proposent des compositions personnalisées qui répondent aux besoins spécifiques des utilisateurs, qu'il s'agisse de bandes sonores pour des jeux, de films, de podcasts ou même de projets personnels, comme la chanson de départ à la retraite d'un collègue. Les défis sont les mêmes que pour la vidéo, paramétrage fin et qualité sont primordiaux pour les professionnels. À ce jeu, **Suno** s'en sort toujours le mieux, talonné par **Udio**, meilleur sur le plan vocal. Soundraw et Beatoven.ai disposent, eux, de licences plus claires et exploitables commercialement. ■ **G. H.**

RUNWAY

À partir d'une simple requête textuelle (« prompt » ci-dessus), l'outil Runway Gen-3 a généré une vidéo (capture d'écran).

INFORMATION

Le futur de la recherche sur le Web

Initialement introduite par Perplexity AI, rapidement suivie par Google avec le lancement de Google AI Overview, puis par OpenAI et son Search GPT annoncé en juillet dernier, la recherche par IA générative risque de profondément transformer notre rapport à l'information. Leurs réponses précises et sourcées donnent à l'utilisateur une alternative innovante aux moteurs de recherche traditionnels. Mais cette innovation peut être coûteuse, d'abord sur le plan environnemental, puisque chaque requête effectuée avec ces modèles consomme près de dix fois plus qu'une recherche traditionnelle. Ensuite, les résumés générés par l'IA sont si efficaces qu'ils pourraient démotiver les utilisateurs à se rendre sur les sites dont le contenu a pourtant été utilisé pour rédiger la réponse. Cette casse du flux de trafic naturel provenant des moteurs de recherche pourrait mettre en péril l'équilibre économique des médias et des acteurs économiques qui dépendent du Web pour se faire connaître. Il s'agit donc de prendre des précautions avec l'IA générative, car si elle nous donne des superpouvoirs inimaginables jusque-là, cela implique toujours de grandes responsabilités.

Trois initiatives françaises pour plus d'éthique et de fiabilité

Afin d'éviter l'effet « boîte noire » des grands modèles de langage actuels sur lesquels se fondent les géants de l'IA, des programmes de recherche travaillent sur des corpus de données publiques et libres d'usage, en privilégiant la fiabilité des réponses et la mise à jour intelligente.

Les plus grands modèles de langage ou LLM, tels que Gemini (Google), ChatGPT (OpenAI) ou Llama (Meta) ont probablement absorbé tout ce qui était disponible sur Internet. Les données libres comme celles protégées par le droit d'auteur, les données pertinentes comme celles sans valeur. Et ils recommencent régulièrement quand de nouvelles données sont disponibles. Une approche ni toujours légale, ni toujours pertinente, et jamais économe en énergie. Mais peut-on faire autrement ? Oui, répondent de nouveaux acteurs, français en particulier.

1 Des données libres et transparentes

Au sein du consortium d'OpenLLM France, ce ne sont pas moins de 850 chercheurs qui ont décidé de rassembler des corpus de données publiques et libres d'usage. « *L'outil LLM Claire mis en ligne fin 2023 fait partie de ceux dont les données proviennent de milieux universitaires, institutionnels ou issus de médias, qui sont tout à la fois légales, certifiées et libres de droit,* détaille Sébastien Lebbe, responsable de la valorisation des logiciels au CNRS. *Nous sommes à l'opposé d'OpenAI, qui passe des accords avec de grands groupes d'édition et de presse pour augmenter la quantité de données, ou exploite sans autorisation d'autres pages Web.* » Des initiatives plus petites proposent également des solutions ambitieuses. Ainsi trois chercheurs associés de Sorbonne Université et de l'université de Wurtzbourg-Schweinfurt (Allemagne), en coordination avec la start-up française Pleias, ont mis en ligne début 2024 Common Corpus, le plus grand ensemble de données du domaine public. Soit plus de 500 milliards de mots.

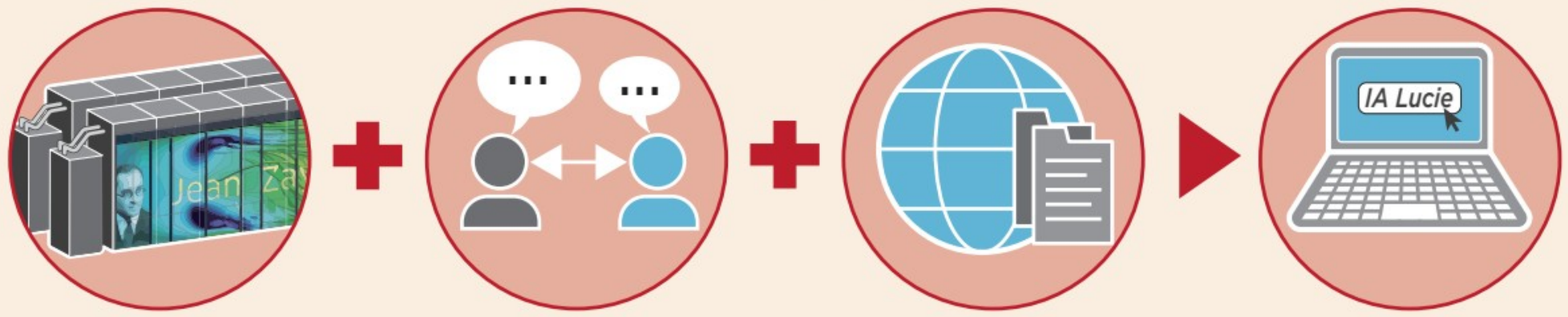
Au-delà des données, la transparence doit concerner la méthodologie d'apprentissage. Or, il n'existe par exemple aucune information sur la façon dont les 8 milliards de paramètres constituant Llama 3 ont été intégrés. Ces paramètres sont pourtant essentiels car ils déterminent la compréhension et l'interprétation des données par l'IA, et donc la qualité de ses réponses. « *Nous avons repris les bases de données de Llama mais en modifiant les critères d'apprentissage* », explique Alexandre Zapolsky, fondateur de la start-up Linagora, pionnière dans le domaine du logiciel libre depuis 2000. Des milliards de contenus (réseaux sociaux, pornographiques, privés…) ont ainsi été filtrés. « *Nous sommes passés de 14 000 à 3000 milliards de mots utilisés* », précise Michel-Marie Maudet, cofondateur. Moins de données, mais elles sont transparentes et toute la méthodologie d'apprentissage a été mise en ligne pour cette nouvelle IA appelée Lucie. Avec une licence commerciale sans restriction, n'importe quel utilisateur, y compris une entreprise industrielle, peut l'utiliser et la modifier à sa guise.

2 Privilégier la qualité à la quantité

« *ChatGPT ou LLama brassent des milliards d'informations sans exigence de fiabilité* », pose Sébastien Lebbe. Leur approche statistique conduit à de nombreux biais, atteste Clément Bénesse, responsable des recherches sur les outils statistiques au sein d'OpenLLM France : « *Les aberrations vont de simples recettes qui indiquent que le meilleur ingrédient pour faire une moutarde est de la com-*

MODÈLE DE LANGAGE

Comment fonctionne Lucie, l'IA conçue par le consortium OpenLLM



LE SUPERCALCULATEUR JEAN-ZAY, l'un des plus puissants en France, est mis à contribution pour l'entraînement du modèle Lucie.

UNE COMMUNAUTÉ DE 850 DÉVELOPPEURS, chercheurs et contributeurs, qui collaborent pour enrichir et développer le modèle.

LES DONNÉES DOIVENT ÊTRE ACCESSIBLES À TOUS, permettant à la communauté de vérifier, enrichir la base d'entraînement et s'assurer de sa qualité.

L'IA LUCIE EST DISPONIBLE SANS AUCUNE RESTRICTION D'USAGE, permettant à tous de l'utiliser, de la modifier et de la partager librement.

BRUNO BOURGEOIS

pote, en passant par des erreurs de calcul du type "14 + 8 = 32" sur les premières versions de ChatGPT, jusqu'à l'absence totale de certification dans les usages professionnels comme la médecine, la jurisprudence… »

Pour attester de la fiabilité des réponses, il faut affiner les données d'apprentissage. « *L'idée consiste à intégrer un fichier de programmation supplémentaire, contenant des "données expertes" qui peuvent aussi bien porter sur de la chirurgie que sur du cinéma* », détaille Clément Bénesse. C'est ce qu'a fait OpenLLM France, avec notamment l'outil Lucie 7B, en recourant à un consortium composé d'ingénieurs programmeurs et de professionnels issus des domaines dans lesquels l'outil est utilisé. « *Nous travaillons par exemple avec des professeurs et des éducateurs pour définir un ensemble de corpus issus de manuels scolaires sélectionnés d'un commun accord* », précise le mathématicien.

3 Être à jour sans tout réapprendre

Progrès scientifique, évolution des cadres légaux, informations nouvelles… La quantité faramineuse d'informations publiées chaque jour sur Internet confronte les concepteurs au problème de la mise à jour. Une fois entraînée, chaque IA possède une somme de connaissances acquises qu'il est très difficile de modifier par la suite. « *Aujourd'hui, les informaticiens des IA type ChatGPT sont obligés de faire table rase de tous les paramètres d'apprentissage et des stockages de données pour effectuer une réactualisation, ils repartent de zéro,* constate Christophe Cerisara, chercheur CNRS en informatique au laboratoire Loria de Nancy. *Non seulement cela coûte très cher, mais 25 tonnes de CO_2 sont produites à chaque fois!* »

Google a ainsi conçu trois nouveaux LLM de Gemini en 2024 et Meta deux nouvelles versions de Llama. Sans parler du coût de chaque mise à jour, estimé à 50 millions d'euros.

Trouver le juste équilibre entre ce qui doit être renouvelé, le *pruning* ou élagage en jargon anglais, et ce qui doit être ajouté, le *growing* ou ce qui doit être enrichi, est « *d'une difficulté algorithmique phénoménale* », admet Christophe Cerisara. Pourtant, les chercheurs français du consortium LLM4ALL ont réussi à la surmonter. « *Notre méthode permet de produire cet apprentissage sans que l'on ait à modifier à chaque fois toute la matrice* », se réjouit l'informaticien. L'idée est de supprimer uniquement certains paramètres du logiciel, ce qui le vide d'une grande partie de sa mémoire, l'obligeant à apprendre d'une nouvelle façon en fonction de données actuelles. ■ **K. N.**

CONFIDENTIALITÉ

Les choix gagnants de Mistral

Fondée en 2023, l'entreprise française Mistral AI mise sur la confidentialité. Son IA propose un mode incognito qui permet aux utilisateurs d'interagir avec l'outil sans que ces échanges soient archivés. Une autre fonction empêche l'IA d'utiliser les données pour son apprentissage et donc de les mettre potentiellement à la disposition d'un autre utilisateur. Son *chatbot* peut être également développé au sein d'une seule communauté et de son réseau, avec ses propres politiques de modération (par exemple, en réservant le terme « phallus » à la seule terminologie médicale, à l'exclusion de toute autre expression).

Deepfakes, la réalité alternative

La génération d'images, de sons ou de vidéos falsifiés prend un essor sans précédent avec une qualité impressionnante. Pour contrer ces « deepfakes » qui inondent les réseaux sociaux, des algorithmes de détection automatisée sont en développement.

Les images générées par l'IA peuvent servir des desseins divers, de la blague à la propagande en passant par le projet littéraire. De gauche à droite : le pape François en doudoune Balenciaga, Arthur Rimbaud dans une rue de Paris et une fillette « survivante » de l'ouragan Hélène.

L'été 2024 ? Celui des *deepfakes*. Le terme — auquel les Québécois préfèrent celui d'« hypertrucages » — désigne ces contenus numériques qui ont l'apparence du vrai, mais qui sont faux, parce que manipulés par l'intelligence artificielle. Il y a d'abord eu les images photoréalistes — le pape en doudoune, Macron en gilet jaune —, mais nous en sommes désormais aux vidéos et aux sons… Ainsi, le 27 juillet dernier, une séquence a parcouru le Web comme une traînée de poudre. Sur les images d'un spot publicitaire électoral, à quelques semaines de l'élection présidentielle américaine, la voix de Kamala Harris déroule un discours stupéfiant : la vice-présidente des États-Unis commente sans ambages la *« sénilité »* de Joe Biden, et assène : *« Je suis à la fois une femme et une personne de couleur, donc si vous critiquez ce que je dis, vous êtes à la fois sexiste et raciste *. »* « *This is amazing* » (« *C'est incroyable* »), a commenté Elon Musk en partageant cette vidéo sur X, anciennement Twitter, le réseau social qu'il a acheté en 2022, sans préciser qu'il s'agissait d'un contenu modifié par IA. La voix n'est en effet pas celle de Kamala Harris, mais une sorte de clone numérique. Ce contenu a été visionné des millions de fois sur le Web : quel pourcentage de ses spectateurs l'a pris pour argent comptant ?

Des techniques de trucage de plus en plus difficiles à détecter

Même période, en Corée du Sud. Le pays du Matin calme prend la mesure d'une épidémie de *deepfakes*. Les mises en scène pornographiques prolifèrent sur Telegram, le service de messagerie cryptée (un milliard d'utilisateurs dans le monde !). Des collégiens ou lycéens récupèrent des photos sur des comptes Instagram pour générer des images sexualisées, partagées ensuite dans des salons de discussion virtuels de Telegram. L'objectif : humilier des camarades de classe et des enseignantes — les victimes de ces montages sont des femmes dans 99 % des cas. La start-up de cybersécurité Security Hero estime que le nombre de ces trucages à base d'IA a augmenté de 500 % en 2023 en Corée du Sud. Les experts préviennent : c'est un tsunami qui s'annonce. *« D'un point de vue technique, la génération d'images, de sons ou de vidéos falsifiés s'améliore à une vitesse vraiment impressionnante,* commente Quentin Bammey, chercheur à l'IVRL (Image and Visual Representation Lab) de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), en Suisse. *C'est inquiétant parce que c'est de plus en plus dur de suivre en matière de détection de ces techniques. »*

PABLO XAVIER ; LUC LOISEAUX ; AI GENERATED

La révolution de l'IA générative, capable de fournir des textes, mais aussi des visuels, à l'aide d'une simple commande textuelle (les « prompts »), est devenue tangible avec le surgissement dans la sphère publique de ChatGPT en novembre 2022. En cinq jours, plus d'un million de personnes s'étaient créé un compte, selon le *New York Times* ; ils sont aujourd'hui plus de 200 millions à utiliser la version gratuite.

À l'instar du programme conçu par la société américaine OpenAI, les algorithmes d'IA générative reposant sur le *deep learning* produisent de façon industrielle et automatisée des fichiers numériques. Une révolution. Encore récemment, ils ne pouvaient pas être créés sans une forte expertise humaine en matière de traitement d'image. Désormais, pour générer une fausse image photoréaliste, plus besoin d'être un orfèvre de Photoshop : il suffit d'un abonnement à Stable Diffusion, Midjourney ou Dall-E, la fonctionnalité de création d'images de ChatGPT.

Le corollaire de cette montée en puissance, c'est que les images truquées sont de mieux en mieux réalisées. Dans le rapport « Deepfakes & algorithme : menace ou opportunité » de 2020, les experts du Club Praxis, *think tank* (groupe de réflexion) franco-américain, évoquaient une liste de signes classiques de défauts récurrents dans les images générées par IA. Une « check-list » facile qui mentionnait par exemple les erreurs d'arrière-plan (une affiche, derrière le personnage photographié, avec des caractères incompréhensibles), des branches de lunettes tordues, des boucles d'oreilles dissymétriques… Un classique : les mains à six doigts. Mais cette liste est désormais frappée d'obsolescence. Les progrès des *deepfakes* sont tels qu'il est illusoire de penser désormais les détecter à l'œil nu.

Que faire ? Il y a d'abord le rempart dressé par le législateur. Les réseaux sociaux, qui sont le vecteur de prédilection des fausses images, ne sont pas au-dessus des lois. Le 8 décembre 2023, l'Union européenne est parvenue à un accord politique sur l'intelligence artificielle. Des étapes techniques doivent encore ▶

PROGRAMMES

Tester la génération de vidéos artificielles

OpenAI a présenté en février 2024 son générateur de vidéos : Sora n'est toujours pas disponible, mais les images de démonstration sont étonnantes. En revanche, il est déjà possible de mettre la main à la pâte en testant d'autres modèles, comme Mochi, Hailuo AI ou Kling AI. Il suffit d'entrer un *prompt* (« un monsieur en salopette rouge répare un évier »), et en une minute le programme fournit une courte séquence vidéo correspondante. Étonnant ! *(Lire aussi p. 33.)*

être franchies avant l'application entière de cet AI Act, mais ce projet de régulation européen stipule que tous les contenus modifiés par IA et partagés en ligne doivent être présentés comme tels.

Reste que pour signaler des hypertrucages, il faut pouvoir les détecter. En raison de leur perfection formelle, l'approche « algorithme versus algorithme » est privilégiée. Ainsi, les experts de la science forensique — qui cherche et exploite les indices pour révéler la véracité d'un document — espèrent mettre au point une détection automatisée des images falsifiées par des logiciels dédiés. *« Je pense que c'est une piste très prometteuse »*, se réjouit Quentin Bammey. Elle passerait notamment par l'analyse de la perspective des *deepfakes* : elle est souvent faussée dans ces images artificielles.

Un exemple ? *« Si on a deux paires de lignes parallèles qui sont sur le même plan, elles vont aller sur des points de fuite différents mais qui sont alignés »*, décrit l'expert. Ces règles géométriques sont vérifiables sur n'importe quelle photo, pas sur un *deepfake*. L'idée est donc d'employer un algorithme de détection pour tracer les lignes de perspective et dévoiler que les points de fuite ne sont pas exactement là où ils devraient être. La méthode, néanmoins, ne constitue pas une formule magique. Elle devrait être fonctionnelle sur des photos avec une très forte perspective, par exemple des bâtiments alignés. Mais celles impliquant des formes très organiques et naturelles — typiquement un visage — intègrent une perspective plus difficile à analyser.

Pas d'algorithme miracle pour repérer les images truquées

De fait, le scénario le plus probable est qu'on n'aura jamais un seul algorithme miracle, traqueur de fausse image, mais qu'il faudra davantage s'appuyer sur une bibliothèque de solutions logicielles, dont chacune donnera un pourcentage de vraisemblance d'un document. De quoi, *in fine*, être mis sur la piste de son caractère trafiqué. *« Il faudra toujours espérer qu'il y ait au moins une des approches logicielles qui permette de détecter la falsification »*, commente Quentin Bammey. Il n'en reste pas moins que les *deepfakes* signent l'entrée dans une nouvelle époque : hier, le présupposé face à une photo était qu'elle était vraie. Ce n'est désormais plus possible de faire confiance aux images : le bon vieil adage *« il faut le voir pour le croire »* est à ranger au placard. ■ **O. L.**

* sciav.fr/935harris

ENCADREMENT

La manière forte pour modérer les réseaux sociaux ?

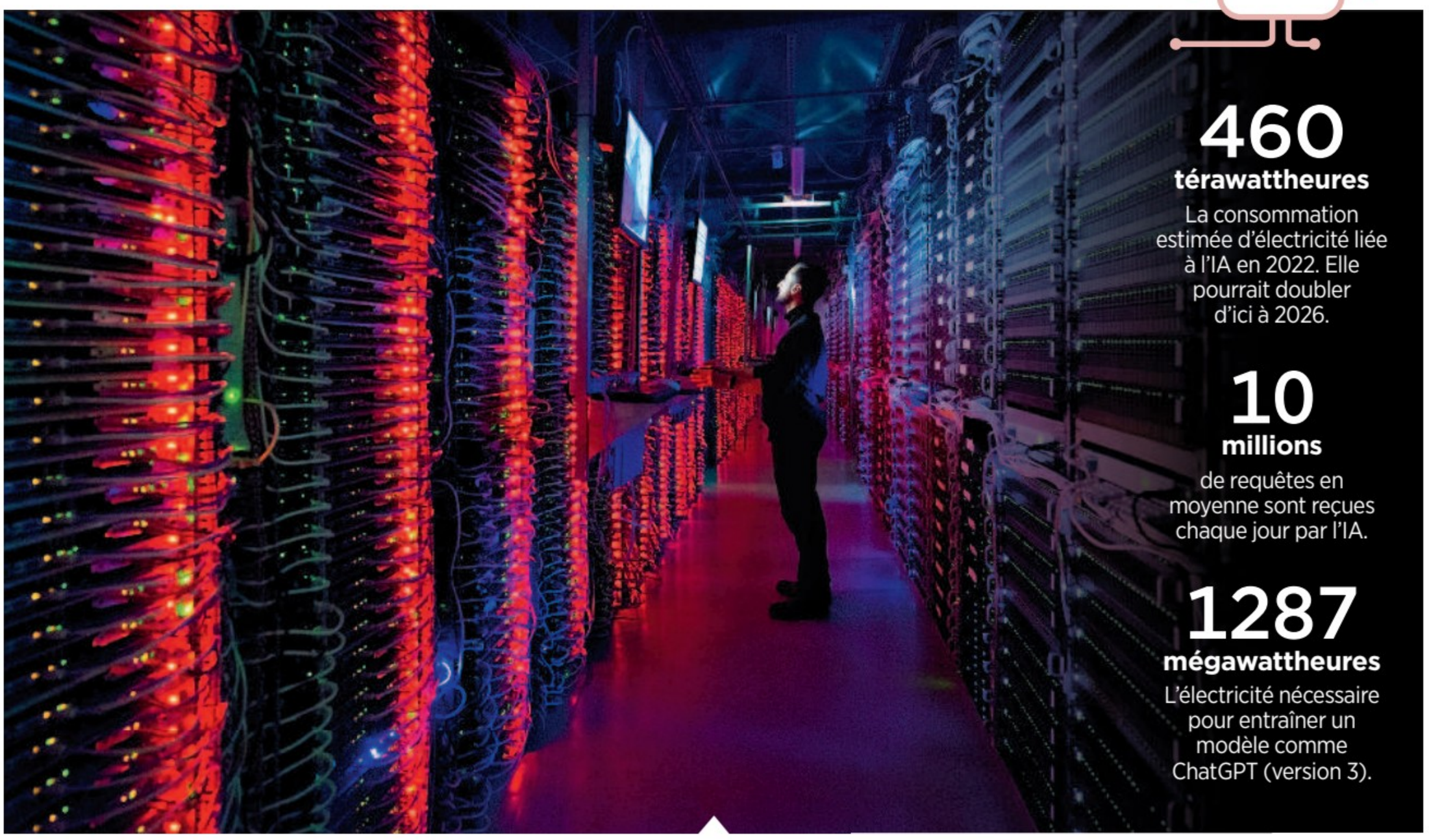
La modération sur les réseaux sociaux est coûteuse, en temps humain comme en investissements technologiques. Aussi, les géants du Web ne s'y plient pas de gaieté de cœur. Il est pourtant possible de les y contraindre. Au Brésil, X a récemment été interdit par décision de la Cour suprême parce que le réseau social dirigé par Elon Musk avait refusé de supprimer des comptes impliqués dans les émeutes après la défaite de l'ancien président d'extrême droite Jair Bolsonaro en 2023. Elon Musk a fini par s'exécuter et X est revenu au Brésil. *« Un précédent ayant valeur de jurisprudence a facilité la mise en œuvre de blocages : WhatsApp a été arrêté en 2016 pendant 72 heures en raison du refus de l'entreprise de fournir des informations dans le cadre d'enquêtes criminelles »*, commente la chercheuse Ophélie Coelho, auteure de *Géopolitique du numérique : l'impérialisme à pas de géants* (Éd. de l'Atelier, 2023). En France, l'arrestation à l'été 2024 du patron de Telegram Pavel Durov a aussi marqué un tournant. À mi-chemin entre le réseau social et la messagerie instantanée, cette plateforme est particulièrement fréquentée par les organisations criminelles et terroristes. De fait, c'est parce qu'il était reproché à Telegram de ne pas agir contre des comportements délictueux que Pavel Durov a été interpellé à Paris. Son arrestation a porté ses fruits : les conditions d'utilisation de Telegram ont été changées pour être moins permissives.

AFP

Elon Musk (en haut), patron de X (ex-Twitter) et **Pavel Durov** (Telegram) ont eu affaire à la justice pour des questions de modération.

POUR EN SAVOIR PLUS

Deep Fake. L'IA au service du faux, d'Olivier Lascar, rédacteur en chef digital de *Sciences et Avenir*, éditions Eyrolles, octobre 2024.



OVHCLOUD / AFP

Le centre de données d'OVH, situé à Beauharnois, près de Montréal (Canada), utilise l'eau d'un barrage hydroélectrique pour refroidir ses installations, afin de minimiser son impact environnemental.

Un véritable gouffre énergétique

La révolution de l'IA a un coût énergétique avec une forte empreinte carbone. Bien qu'elle permette des optimisations significatives ayant un impact positif sur l'environnement dans de nombreux domaines, le rapport coût-bénéfice est encore loin d'être favorable.

Environ 2 % de la consommation mondiale d'électricité. Voilà ce que consomment aujourd'hui les centres de données, supports des technologies de l'intelligence artificielle (IA) et des *blockchains*, selon un rapport de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) publié en 2024. Quelle part représente précisément l'IA dans cette estimation ? Il est extrêmement difficile de le savoir. Notamment parce qu'une fois son apprentissage terminé, une IA est déployée sur plusieurs serveurs installés un peu partout dans le monde. Or ceux-ci sont généralement partagés avec de multiples applications d'analyse, de stockage et de traitement de données. S'il est facile de mesurer la consommation électrique d'un serveur informatique, il est en revanche beaucoup plus compliqué de savoir combien consomme chaque application. Certes, la chose n'est pas impossible, mais elle demande une méthodologie parfois complexe, le déploiement d'outils spécifiques, et donc des frais supplémentaires.

De plus, l'absence de standardisation dans le calcul de la consommation d'une IA complique singulièrement la donne. Certaines estimations incluent l'énergie consommée pour la fabrication des équipements, tandis que d'autres ▸

excluent les dépenses liées au refroidissement des serveurs. Certaines ne comptabilisent que l'énergie dépensée lors de l'entraînement de l'IA, tandis que d'autres prennent également en compte son usage lorsqu'elle est déployée.

La phase d'entraînement, particulièrement énergivore

C'est la raison pour laquelle, lorsque l'on cherche à comparer la consommation des IA, il est souvent plus simple de se focaliser uniquement sur la phase d'entraînement. Non seulement parce qu'elle est réalisée dans des serveurs exclusivement réservés à cet usage, mais aussi parce que c'est la plus gourmande en énergie. Selon une étude chinoise publiée en août dernier dans *Nature*, entraîner un modèle comme ChatGPT (version 3) nécessite 1287 mégawattheures (MWh) d'électricité, soit l'équivalent de la consommation annuelle de 120 foyers américains. « *90 % de l'énergie consommée durant cette phase provient du mouvement continu des données, entre le lieu de stockage et celui de traitement* », estime Dejan Glavas, directeur de l'institut IA for Sustainability, une structure consacrée à la promotion de la recherche interdisciplinaire sur l'intelligence artificielle. Or, la précision d'une IA est étroitement liée à la quantité de données qu'on lui a fournies pour s'entraîner. Par exemple, si vous entraînez une IA à identifier des végétaux, il faudra lui fournir des milliards d'images pour qu'elle soit capable de reconnaître correctement chaque plante. Et plus il y en aura, moins le risque d'erreur sera grand.

Une fois que l'IA est « éduquée » et déployée, c'est-à-dire mise en service, elle continue à consommer beaucoup d'énergie pour traiter les requêtes des utilisateurs, mais bien moins que durant sa phase d'entraînement. « *Bâtir une IA, c'est un peu comme construire l'infrastructure de transports d'une ville : vous allez dépenser énormément d'énergie pour mettre en place les voies de circulation, les bus, les trams et les métros… Par la suite, la dépense énergétique pour faire fonctionner tout cela demeure mais elle est bien moindre* », explique Dejan Glavas. Un « moindre » à relativiser toutefois, puisque dans la dernière version de ChatGPT (la quatrième), chaque requête consomme 0,0005 kWh. Pour 10 millions de requêtes quotidiennes — la moyenne de ce que reçoit l'IA —, cela équivaut à une consommation annuelle d'environ 1825 MWh pour GPT-4, soit l'équivalent d'environ 170 foyers américains alimentés en un an.

Et le problème de la consommation de l'IA devient encore plus inextricable si l'on cherche à l'exprimer en termes d'empreinte carbone. Car celle-ci est étroitement liée à la nature de l'électricité consommée pour faire fonctionner l'IA. En moyenne, un kilowattheure produit à partir de charbon génère

RESSOURCE

Des installations et matériaux gourmands en eau

Les centres de données nécessaires au développement de l'intelligence artificielle sont de grands consommateurs d'eau. Selon une étude conduite par l'université de Californie à Riverside (États-Unis), publiée sur le site arXiv (et donc non validée par les pairs), Google, Microsoft et Meta ont utilisé en 2022 environ 2,2 milliards de mètres cubes d'eau pour refroidir leurs installations. Selon l'étude, cette consommation pourrait augmenter d'ici à 2027 et atteindre 4,2 à 6,6 milliards de mètres cubes, soit l'équivalent de la moitié des besoins annuels du Royaume-Uni. Cette dépense est liée non seulement au refroidissement des serveurs par des circuits d'eau (*watercooling*), mais aussi à la consommation d'eau pour fabriquer les semi-conducteurs (cartes graphiques, processeurs…) qui constituent l'infrastructure de l'IA. D'après les travaux d'une équipe

REQUÊTES

Comment réduire son empreinte énergétique ?

PRIVILÉGIER LES MODÈLES SPÉCIALISÉS

Une requête sur Google consomme dix fois moins d'énergie que sur ChatGPT. Si une réponse simple suffit, préférer le moteur de recherche. De même, pas besoin de passer par une IA généraliste pour traduire un texte. DeepL Translator ou Google Translate donneront des résultats tout aussi satisfaisants.

UTILISER DES IA « LÉGÈRES »

Pour un usage généraliste, il est préférable d'utiliser des modèles comme Mistral, conçus pour une consommation optimisée (*lire p. 34*).

PRIVILÉGIER LES IMAGES EXISTANTES

Générer une image au moyen d'une intelligence artificielle consomme 60 fois plus d'énergie qu'un texte. Pour illustrer ses productions, privilégier les images déjà existantes.

GOOGLE/ZUMA/REA

Le refroidissement des serveurs (ici au centre de données de Google dans l'Oregon, aux États-Unis) génère une dépense excessive d'eau.

chinoise, publiés en 2023, qui a passé en revue la consommation d'eau de 24 gros producteurs de semi-conducteurs (tels que Samsung, Intel ou Seagate), celle-ci était en 2021 de 751 millions de mètres cubes, soit l'équivalent de la consommation annuelle d'environ 13,7 millions de Français.

plus de 820 grammes d'équivalent CO_2, contre 24 g pour l'hydroélectricité et 12 g pour le nucléaire, d'après les données de 2014 du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec). L'empreinte carbone dépend donc de l'endroit où est situé le serveur qui va traiter les requêtes, c'est-à-dire des sources d'énergie locales utilisées pour alimenter les centres de données.

De façon paradoxale, parmi la kyrielle de domaines d'application de l'IA, est avancé celui de… la réduction de la consommation énergétique. Google, par exemple, a utilisé l'IA pour réduire de 40 % l'énergie nécessaire au refroidissement de ses centres de données en prévoyant précisément les pics d'activité. De son côté, le transporteur DHL explique que le déploiement de l'IA dans le cadre de la logistique du dernier kilomètre lui a permis d'optimiser le chargement de ses camions et de ses itinéraires de livraison, réduisant ainsi la consommation de carburant. Dans un autre registre, l'exploitation de l'IA Deepmind (Google) a permis d'augmenter de 20 % la valeur de l'électricité produite par un champ d'éoliennes aux États-Unis en se montrant capable d'anticiper les vents (et donc la production énergétique) avec une journée d'avance. Augmenter ainsi la rentabilité des énergies renouvelables contribue indirectement à leur déploiement.

Une étude conduite par le cabinet de conseils Boston Consulting Group sur l'impact de l'IA et son potentiel de réduction des émissions de carbone estime les émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) à environ 53 gigatonnes (Gt) en 2021, date de publication du rapport. *« L'utilisation de l'IA peut permettre de réduire les émissions globales de 5 à 10 %, soit l'équivalent de 2,6 à 5,3 Gt d'équivalent CO_2 si elle était appliquée à toutes les émissions »*, avance l'étude. Ce qui est loin d'être négligeable, mais pas suffisant pour réduire les émissions de moitié d'ici à 2030, objectif nécessaire pour contenir le réchauffement climatique sous les 1,5 °C, défini durant l'accord de Paris de 2016.

La course à la précision devrait atteindre ses limites planétaires

De plus, la consommation énergétique liée au développement de l'IA est loin d'être sur une pente descendante. Tout d'abord, parce que certains concepteurs d'IA se livrent à une course pour développer les modèles les plus précis, et donc les plus gourmands en ressources. Ensuite, parce que les IA sont de plus en plus nombreuses. Selon le rapport AI Index de l'université Stanford (États-Unis), rien qu'en 2023, pas moins de 87 nouveaux modèles d'apprentissage machine sont nés soit du secteur privé, soit de la recherche académique, ou d'une collaboration entre les deux.

D'après l'Agence internationale de l'énergie, cette consommation liée à l'IA, estimée en 2022 à environ 460 térawattheures (TWh), devrait plus que doubler d'ici à 2026, en franchissant la barre des 1000 TWh, soit l'équivalent de la consommation électrique annuelle du Japon ! À ce rythme, il est peu probable que les gains énergétiques que pourrait générer l'IA parviennent à contrebalancer les coûts de son développement et de son utilisation. *« Mais cette course sans fin à la précision va finir par se heurter à des limites planétaires, non seulement au niveau énergétique, mais aussi des données disponibles,* conclut Dejan Glavas. *Aujourd'hui, on a aspiré et traité l'équivalent d'Internet pour entraîner des modèles comme GPT-4, et on manque désormais d'écrits humains ! »* ■ **E. L.**

DEJAN GLAVAS

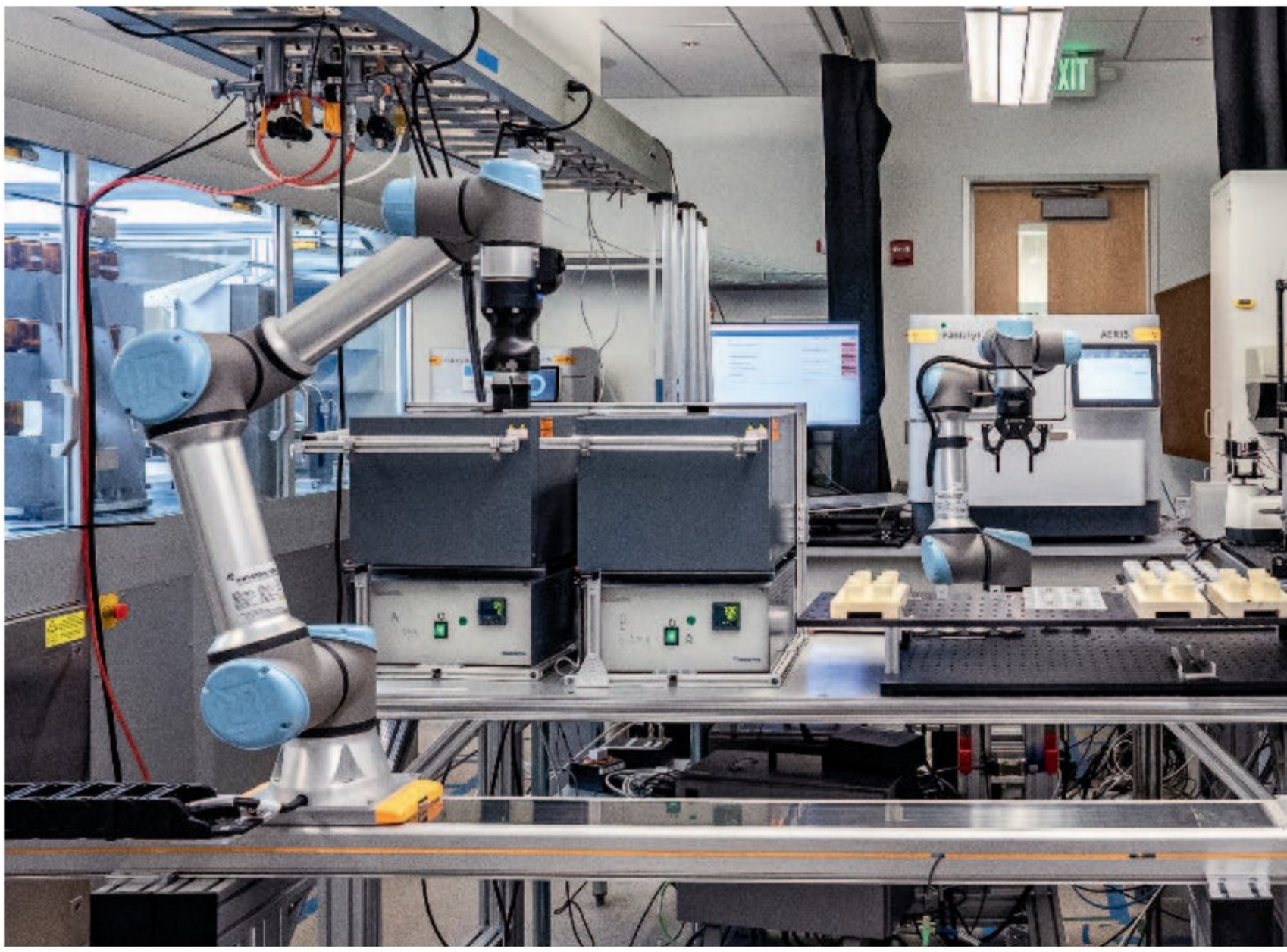
« Bâtir une IA, c'est un peu comme construire l'infrastructure de transports d'une ville »

Dejan Glavas, directeur de l'institut IA for Sustainability (institut d'IA pour le développement durable), à Boulogne-Billancourt

Des robots experts dans la conception de nouveaux matériaux

L'intelligence artificielle devrait permettre d'accélérer nettement la découverte de matériaux pour une grande variété d'applications, des panneaux solaires aux polymères biosourcés en passant par la production d'hydrogène. Un laboratoire automatisé a pu tester une centaine d'échantillons par jour et générer des dizaines de matériaux jusqu'ici inconnus.

Par Franck Daninos



MARILYN SARGENT/BERKELEY LAB

Dans un coin de la salle, un bras articulé collecte, pèse et mélange un ensemble d'ingrédients parmi 200 substances chimiques disponibles, comme du carbonate de lithium et des oxydes métalliques contenant du cuivre, du fer, du nickel ou du manganèse. Une ligne robotisée achemine ces mixtures dans des fours où la température, le temps de chauffe et l'injection de gaz sont contrôlés par ordinateur. Une troisième machine récupère ensuite les produits de réaction qu'elle réduit en poudre et analyse avec un faisceau de rayons X. Si ceux-ci se sont évaporés, forment une bouillie ou ne sont pas conformes aux prédictions, un nouveau cycle est automatiquement enclenché. Le dispositif ajuste la recette et établit de lui-même un autre protocole de synthèse, autant qu'il le faudra et sans interruption jusqu'à obtenir le solide cristallin attendu !

Présenté il y a un an à la communauté scientifique, l'A-Lab du Laboratoire national Lawrence-Berkeley, qui dépend du département de l'Énergie des États-Unis, est le premier laboratoire entièrement automatisé à utiliser des composés inorganiques solides pour fabriquer de nouveaux matériaux, afin d'accroître l'autonomie et la sécurité des batteries au lithium notamment. Grâce à des IA analysant de gigantesques bases de données et apprenant de leurs propres erreurs, il a ainsi pu tester une centaine d'échantillons par jour et générer 41 matériaux jusqu'ici inconnus. Le tout en un peu plus de deux semaines, alors que la mise au point d'un seul spécimen aurait nécessité des mois de travail à un ingénieur ! Ces matériaux avaient été théorisés eux-mêmes par une autre IA : le logiciel Gnome (Graph networks for materials exploration) de l'entreprise américaine Google DeepMind. Il avait d'abord prédit 2,2 millions de structures cristallines possibles, avant d'en sélectionner 380 000 pour leur stabilité et retenir les plus prometteuses.

Ce type d'approche pourrait révolutionner dans les années à venir la manière de concevoir des matériaux. Elle est expérimentée actuellement un peu partout dans le monde dans des installations de pointe : aux États-Unis, au Canada, en Allemagne, en Suisse ou encore au Japon — et depuis quelques années en France, où a été créé notamment le Programme et équipe- ▶

▲ **Le laboratoire automatisé A-Lab,** à Berkeley (États-Unis), teste de nouveaux matériaux grâce à des robots pilotés par IA. Il a ainsi pu générer 41 matériaux inédits, à partir de 2,2 millions de structures cristallines suggérées par une autre IA, Gnome, de l'américain Google DeepMind.

ment prioritaire de recherche Diadem (Dispositif intégré pour l'accélération du déploiement de matériaux émergents) en 2021. « *Les techniques d'IA devraient permettre d'accélérer considérablement la découverte de matériaux pour une variété d'applications comme les panneaux solaires, les polymères biosourcés ou la production d'hydrogène* », s'émerveille Mario Maglione, chercheur à l'Institut de chimie de la matière condensée de Bordeaux (ICMCB), qui codirige Diadem (*lire l'encadré ci-contre*). « *Les financements étatiques et privés affluent* », se réjouit Marco Saitta, directeur du groupement de recherche Intelligence artificielle en sciences des matériaux fondé en 2022 par le CNRS. « *Dans notre communauté, tout le monde se rend compte que l'IA joue un rôle de plus en plus important*, observe le physicien. *Il est devenu inimaginable, aujourd'hui, de lancer un projet de recherche sans intégrer ces techniques.* »

MARCO SAITTA

« Il est devenu inimaginable, aujourd'hui, de lancer un projet de recherche sans intégrer ces techniques »

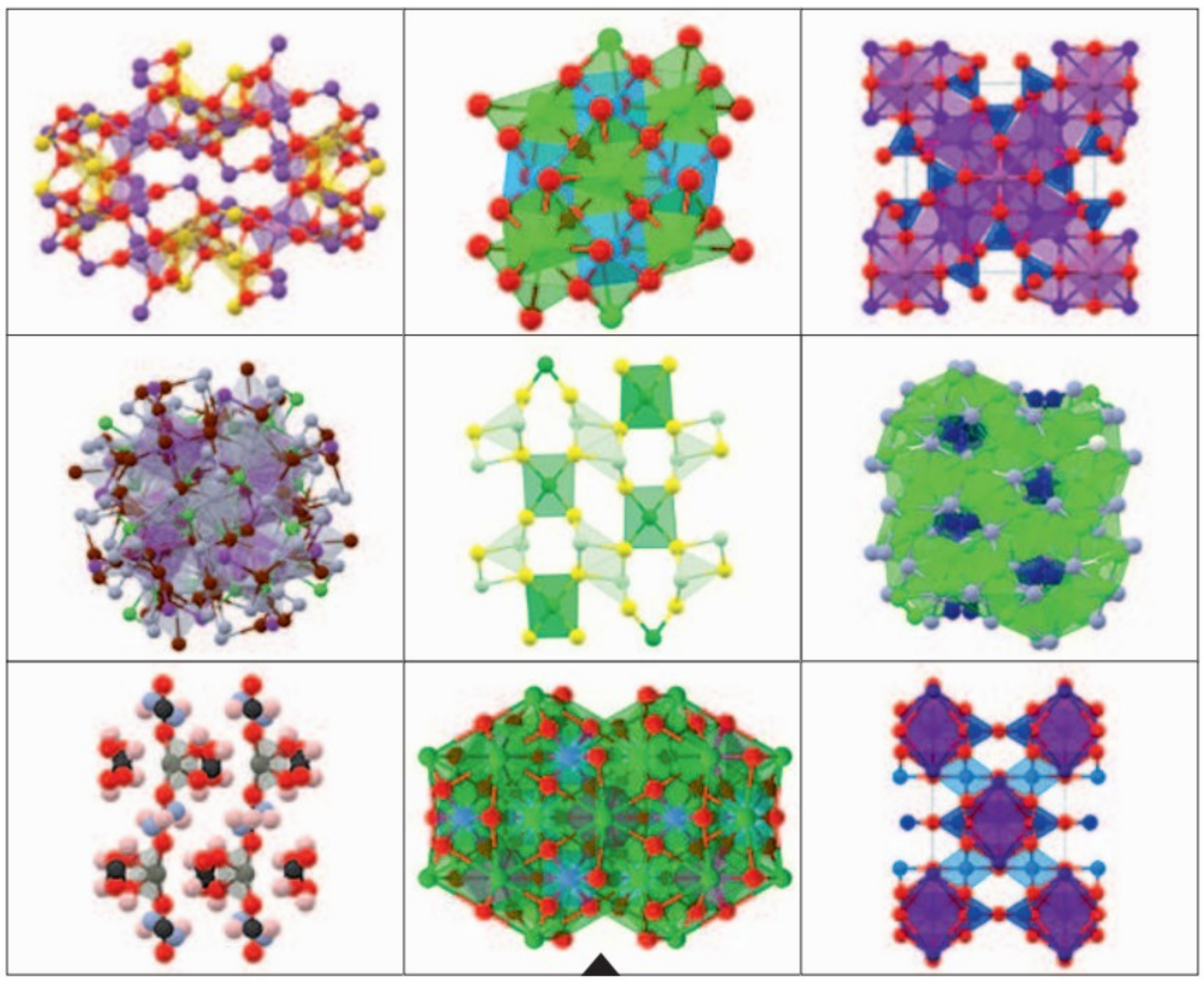
Marco Saitta, directeur du groupement de recherche Intelligence artificielle en sciences des matériaux (CNRS)

Le rôle clé des progrès de l'IA en biologie moléculaire

Les succès spectaculaires de l'IA en biochimie moléculaire ont joué un rôle clé. Ils ont montré, dès le début des années 2000, que des algorithmes d'apprentissage automatique pouvaient prédire de plus en plus fidèlement la structure tridimensionnelle de myriades de protéines à partir de séquences d'acides aminés (*lire p. 75*). « *Ces résultats ont suscité un fort enthousiasme et des espoirs similaires à l'égard d'un domaine voisin : la chimie inorganique, et plus généralement les sciences des matériaux* », relève Mathieu Galtier, informaticien qui a travaillé pendant plus de dix ans pour la recherche biomédicale avant de cofonder au printemps 2024 Entalpic, une start-up développant des outils d'IA pour l'industrie chimique.

Pionniers en la matière, les États-Unis avaient lancé ainsi dès 2011 le Materials Genome Initiative, ambitieux programme de recherche fédéral visant à réduire le temps et le coût de fabrication de matériaux utilisés dans des secteurs stratégiques comme les semi-conducteurs. L'IA devait faciliter l'identification de matériaux innovants et — par analogie avec le génome des organismes — leur « fiche d'identité » : les atomes qu'ils contiennent, la manière dont ceux-ci sont organisés, les procédés de fabrication et de mise en forme au regard des fonctionnalités visées, etc. « *Tous ces paramètres et étapes engendrent toutefois une immense complexité,* signale Mario Maglione. *Et c'est sans doute pour cette raison que l'IA ne commencera à être utilisée en sciences des matériaux qu'une dizaine d'années après le domaine biomédical.* »

Les promesses n'en sont pas moins vertigineuses. Pour en prendre la mesure, il faut rappeler à quel point l'élaboration d'un matériau constitue un travail long, ingrat et fastidieux. Tout débute parfois par l'intuition d'un chercheur ou une découverte hasardeuse. Mais les scientifiques partent le plus souvent de systèmes existants qu'ils améliorent par petites touches, en substituant un atome par un autre ou en modifiant les proportions. Chaque candidat fera alors l'objet de modélisations complexes fondées sur la physique quantique et nécessitant des supercalculateurs. « *Elles permettent de simuler les interactions entre atomes,*


JENNY NUSS/BERKELEY LAB

Extrait de la grande base de données des structures cristallines mise à disposition des chercheurs par le Berkeley Lab, contenant des informations précieuses sur les matériaux.

leurs agencements et la stabilité thermodynamique du composé, précise Marco Saitta. *Et prédire ensuite un ensemble de propriétés, optiques ou magnétiques par exemple, conférant au matériau la fonctionnalité recherchée.* » Celui-ci sera alors synthétisé, mis en forme et analysé par une batterie d'instruments. Mais il faudra souvent revenir à la case départ, tâtonner et ajuster de nombreux paramètres pour obtenir un résultat probant.

L'IA pourrait accélérer cinq fois le rythme des découvertes

Les algorithmes d'apprentissage procèdent aussi par essais et erreurs. Mais de manière extrêmement rapide, non biaisée et systématique. On peut demander à une IA, par exemple, de tester dans un alliage de cuivre, de fer, de titane et d'aluminium toutes les combinaisons possibles — de 0 à 100 % pour chacun des atomes. Ou éprouver toute une famille d'éléments comme les terres rares ou les alcalino-terreux. « *Il faudra certes générer d'abord des bases de données spécifiques, afin que les algorithmes apprennent les lois régissant la structure et la stabilité d'une classe de matériaux* », indique Marco Saitta. Mais ils pourront ensuite les extrapoler et se passer de l'étape très longue du calcul quantique pour prédire l'architecture d'un nombre faramineux de substances. Il en va de même pour les propriétés fonctionnelles, établies sur d'autres jeux de données. « *Ce qui est remarquable c'est que différents types d'algorithmes pourront fonctionner en tandem,* souligne Mathieu Galtier. *Les modèles prédictifs serviront en quelque sorte de lampes torches, d'oracles, à des modèles dits génératifs programmés pour suggérer et sélectionner des structures selon certains critères, comme la capacité à activer une réaction chimique par exemple.* » Ils exploreront ainsi, de façon autonome et itérative, de gigantesques espaces de configurations.

En juillet 2024, une IA de Microsoft a identifié de cette manière un nouvel électrolyte solide qui permettrait aux batteries électriques de consommer 70 % en moins de lithium — élément dont le coût financier et environnemental est considérable. Ses algorithmes ont criblé pour cela 32 millions de composés potentiels avant de les réduire — en seulement 80 heures — à 500 000, puis 800, puis 150, puis 23… et proposer finalement un assemblage de lithium, de sodium, d'yttrium et de chlore. Ce prototype, qui fait actuellement l'objet d'une série de tests, « *pourrait ne pas fonctionner à large échelle* », prévient Microsoft. Car les propriétés d'un matériau, aussi exceptionnelles soient-elles, ne garantissent pas une exploitation industrielle. Quantité de facteurs doivent être pris en compte, comme les conditions de fabrication, la compétitivité, la rareté (ou criticité) des matières premières ou la compatibilité avec d'autres substances utilisées dans la technologie ciblée. « *Les matériaux conçus par Google DeepMind et l'A-Lab présentent ainsi différents types de problèmes que les spécialistes des batteries au lithium ont immédiatement relevés* », explique Mario Maglione. L'expérience et le regard critique des chercheurs demeurent ainsi essentiels : un peu comme un radiologue utilisant un tas de machines et d'images mais qui pose lui-même le diagnostic final ! Il n'en demeure pas moins qu'une IA, en explorant un nombre incommensurable de possibilités, pourra indiquer aux scientifiques « *des pistes et zones de composition restreintes qu'ils n'auraient pas trouvées spontanément, comme des relations non évidentes entre des structures atomiques et des propriétés d'intérêt* », pose Mathieu Galtier. Finalement, l'IA pourrait accélérer « *jusqu'à cinq fois le rythme des découvertes* », estime Mario Maglione, et condenser ainsi en cinq ans ce qui en aurait nécessité vingt-cinq par les méthodes habituelles. « *Un espoir majeur,* insiste l'expert. *Car au regard des transitions actuelles, notamment énergétiques et environnementales, nous savons que nous n'avons pas des décennies devant nous.* » ■

PROGRAMME

Rattraper le retard de la France

Financé à hauteur de 85 millions d'euros par le plan gouvernemental France 2030, le programme Diadem entend accélérer « *la conception et l'arrivée sur le marché de matériaux plus performants et durables* » grâce à l'IA et rattraper en la matière « *le retard de la France* », précise son codirecteur Mario Maglione. Piloté par le CNRS et le CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives), il développe un réseau de plateformes sur tout le territoire. Avec pour ambition de combiner, de façon intégrée, des bases de données, des infrastructures d'IA et des installations robotiques permettant de modéliser, caractériser et synthétiser à haut débit des matériaux innovants. « *Ces équipements seront pleinement opérationnels en septembre 2025* », annonce Mario Maglione. Ils seront accessibles à 4000 chercheurs grâce à une trentaine de projets. Parmi les objectifs visés : des composés plus efficaces pour piéger les polluants atmosphériques, accélérer une variété de réactions chimiques ou protéger les métaux de la corrosion.

Les théorèmes à l'heure de l'innovation algorithmique

En 2021, une IA a résolu un problème dans le domaine de la théorie des nœuds. À l'été 2024, AlphaProof, un modèle d'apprentissage par renforcement, a réussi trois des six problèmes des Olympiades de mathématiques. Jusqu'où ira la machine ?

« *ChatGPT, démontre-moi l'hypothèse de Riemann.* » Quand on pose la question au chatbot bien connu d'OpenAI, il l'élude. Il préfère nous rappeler que la conjecture de Riemann est l'un des sept fameux « problèmes du millénaire », un ensemble de questions réputées extrêmement difficiles à résoudre. Mais c'est tout. Les mathématiques sont l'une des fiertés de l'humanité, et il paraît presque inconcevable que l'IA s'y illustre. Pourtant, depuis trois ans, de plus en plus de chercheurs explorent l'aide qu'elle peut apporter dans les mathématiques. Et plus les progrès arrivent, moins ils voient de questions qu'elle ne pourrait résoudre.

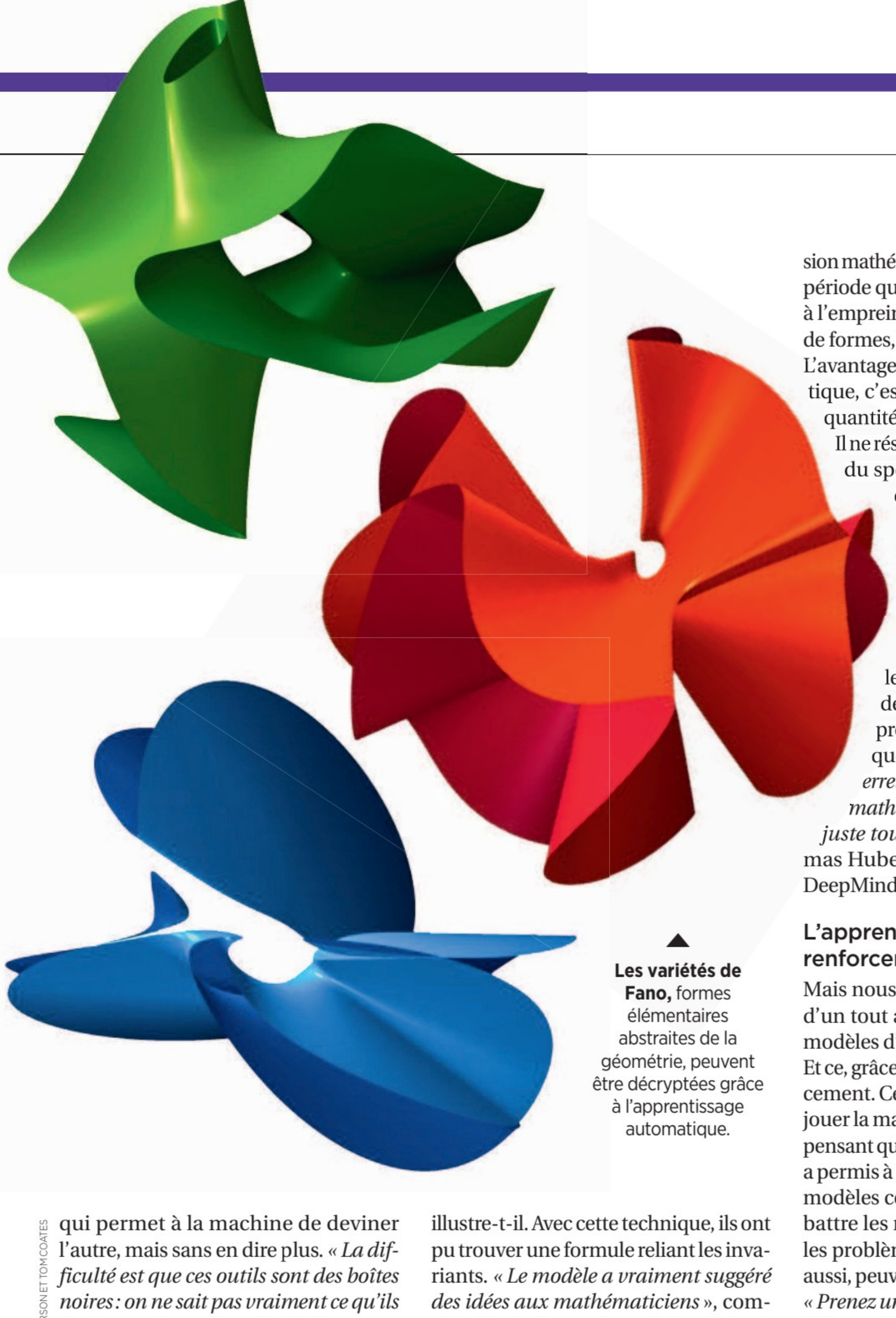
Le pavé dans la mare a été lancé en 2021 par des chercheurs de Google DeepMind, des universités de Sydney (Australie) et d'Oxford (Royaume-Uni). Dans un article publié dans *Nature*, ils expliquent comment ils se sont servis des outils de l'IA pour résoudre un problème du domaine de la théorie des nœuds. « *Ce travail a constitué une véritable percée, car il a montré qu'il était possible d'utiliser le* machine learning [apprentissage automatique] *en mathématiques fondamentales* », se souvient Radmila Sazdanovic, chercheuse à l'université d'État de Caroline du Nord (États-Unis). La théorie des nœuds est une discipline qui étudie les manières d'entortiller une corde. Une des questions importantes, mais difficiles, est de distinguer deux nœuds : quand on colle les deux bouts de la corde, deux nœuds sont différents si on ne peut pas passer de l'un à l'autre sans couper la corde. Pour répondre à ce type de questions, les mathématiciens ont créé des objets, appelés invariants de nœuds, qui permettent de les distinguer. « *On peut les voir comme des images d'un nœud depuis différents points de vue* », propose Radmila Sazdanovic. Pour faciliter les calculs parfois complexes des invariants et mieux les comprendre, il est intéressant de savoir s'il existe une formule pour passer d'un invariant à un autre. C'est pour répondre à cette question qu'en 2021, les chercheurs ont entraîné un modèle d'IA sur une base de données de plus de 2 millions de nœuds dotés de deux invariants. La mission de l'ordinateur était alors de deviner un invariant lorsqu'on lui donnait l'autre. Ce qu'il a réussi.

Si les chercheurs en restaient là, ils auraient pour information qu'il y a bien un lien unissant les deux invariants, ce

IMPERIAL COLLEGE LONDON

« Si la machine devient si performante, j'aurai du mal à justifier de continuer la recherche »

Kevin Buzzard, mathématicien à l'Imperial College de Londres (Royaume-Uni)



▲ **Les variétés de Fano,** formes élémentaires abstraites de la géométrie, peuvent être décryptées grâce à l'apprentissage automatique.

A. MACPHERSON ET TOM COATES

qui permet à la machine de deviner l'autre, mais sans en dire plus. « *La difficulté est que ces outils sont des boîtes noires : on ne sait pas vraiment ce qu'ils font* », souligne Geordie Williamson, chercheur à l'université de Sydney qui a participé à l'étude. Heureusement, il est possible de décoder les choix de l'algorithme grâce à une technique appelée analyse de saillance. « *Imaginez qu'on a une boîte noire qui reconnaît les images de tigre : on peut cacher successivement toutes les parties des photos pour identifier celles qui comptent pour reconnaître l'animal. C'est un peu ce qu'on a fait ici* », illustre-t-il. Avec cette technique, ils ont pu trouver une formule reliant les invariants. « *Le modèle a vraiment suggéré des idées aux mathématiciens* », complète Kevin Buzzard, mathématicien à l'Imperial College de Londres (Royaume-Uni). Malgré ce succès, l'adoption de ces outils est timide dans la communauté mathématique. « *Les mathématiciens sont assez conservateurs* », admet-il.

D'autres travaux ont toutefois vu le jour par la suite. À l'instar des chercheurs de l'Imperial College de Londres et de l'université de Nottingham (Royaume-Uni), qui cherchaient à déchiffrer une expression mathématique compliquée, appelée période quantique, qui est comparable à l'empreinte digitale d'un certain type de formes, les variétés de Fano.

L'avantage de l'apprentissage automatique, c'est sa capacité à analyser des quantités considérables de données. Il ne résout pas le problème à la place du spécialiste mais aide à mieux comprendre des données, suggère des liens, génère des exemples ou des contre-exemples, oriente un calcul d'une manière astucieuse… Les mathématiciens sont alors là pour comprendre les retours de l'algorithme, en déduire des conjectures et les prouver. Tout en gardant en tête que « *le modèle peut faire une erreur à tout moment. Alors qu'en mathématiques il faut que cela soit juste tout le temps* », souligne Thomas Hubert, chercheur chez Google DeepMind.

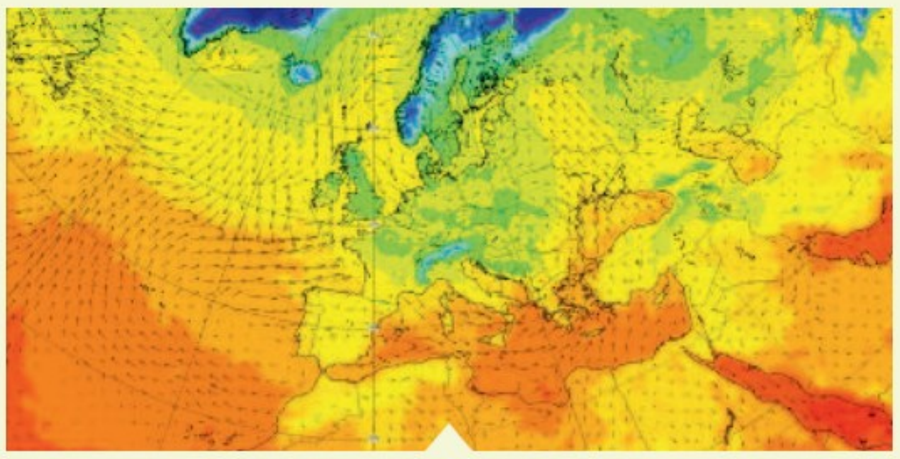
L'apprentissage par renforcement évite les erreurs

Mais nous sommes peut-être à l'aube d'un tout autre avènement : celui des modèles d'IA qui ne font pas d'erreurs. Et ce, grâce à l'apprentissage par renforcement. Cette méthode consiste à faire jouer la machine à un jeu, en la récompensant quand elle réussit. C'est elle qui a permis à DeepMind de concevoir des modèles comme AlphaGo, capable de battre les meilleurs joueurs de go. Or les problèmes de mathématiques, eux aussi, peuvent être vus comme des jeux. « *Prenez une conjecture : il y a des hypothèses et le but est de montrer qu'elle est vraie. Le jeu auquel la machine va jouer est de trouver le cheminement des hypothèses au but,* éclaire Sergei Gukov, chercheur au California Institute of Technology (États-Unis). *Et l'un des intérêts principaux de cette technique, c'est que lorsque le modèle résout une question, nous sommes certains qu'il n'y a aucune erreur.* » Quand l'algorithme réussit le jeu, le problème est dénoué. ▶

UTILISATIONS

Des applications au-delà des mathématiques

Employer les outils de l'IA dans les mathématiques, cela n'a pas pour seule utilité la résolution de problèmes théoriques de longue date.
« *À partir du moment où nous aurons des modèles capables de faire des mathématiques, des applications commerciales vont suivre* », annonce Sergei Gukov, chercheur au California Institute of Technology (États-Unis). La prévision météo est un premier exemple de ces applications, « *car les équations utilisées sont si complexes qu'on ne peut pas les résoudre exactement* », explique Radmila Sazdanovic, chercheuse à l'université d'État de Caroline du Nord (États-Unis). Ensuite, l'apprentissage par renforcement permet d'imaginer des utilisations dans des domaines critiques comme la finance. Enfin et comme un cercle vertueux, le domaine de l'IA, lui-même, pourrait en bénéficier. Pour créer des modèles capables de s'attaquer aux problèmes mathématiques difficiles (comme les conjectures ouvertes), les chercheurs doivent développer de nouveaux algorithmes et de nouvelles architectures de réseaux de neurones. Le but est de créer des systèmes capables de trouver le très long chemin qui mène à la réponse, « *et c'est ce dont on a besoin pour faire progresser le niveau actuel de l'IA vers l'IA générale* », précise Sergei Gukov.



ECMWF

Prévisions météo en Europe le 25 novembre 2024 produites par le modèle d'IA Pangu-Weather.

Depuis quelques mois, certains s'en servent donc en mathématiques.
C'est le cas de DeepMind, qui a présenté à l'été dernier AlphaProof, un modèle d'apprentissage par renforcement reposant sur l'assistant de preuves Lean, un logiciel qui vérifie si une démonstration est correcte. Leur idée est proche d'AlphaGo, mais ici, plutôt que de générer des coups au cours d'une partie de jeu de go jusqu'à la victoire, leur programme écrit des lignes de démonstration jusqu'au CQFD. Cette idée a été mise à l'épreuve au sein d'un concours réputé : les Olympiades internationales de mathématiques, une compétition ouverte aux élèves en fin de lycée. Les questions posées demandent beaucoup d'astuces et de réflexion. Avant la compétition, AlphaProof — comme les élèves — s'est entraîné, a ingurgité un grand nombre de problèmes. Le jour du concours, le modèle a réussi trois des six problèmes (même s'il lui a fallu jusqu'à trois jours pour certains). « *J'étais impressionné. Avant leur exploit, je n'aurais jamais pensé que l'IA pourrait réussir ne serait-ce qu'un des problèmes !* », se souvient Kevin Buzzard.
D'autres équipes ont utilisé l'apprentissage par renforcement pour se frotter à des problèmes ouverts de recherche. Sergei Gukov et ses collègues ont testé des contre-exemples de la conjecture d'Andrews-Curtis. Il s'agit d'un problème que beaucoup pensent faux et issu de la théorie des groupes, domaine qui étudie des ensembles d'objets avec une structure particulière. Sans même besoin d'un corpus de données d'apprentissage, ils ont testé la validité de contre-exemples supposés à cette conjecture. Et ils ont montré qu'aucun de ceux-ci n'invalide la question. Pour l'heure, la conjecture d'Andrews-Curtis tient donc toujours…

Pouvoir atteindre un jour les problèmes du millénaire

Avec ces succès, la question s'impose d'elle-même : où est la limite dans ce que pourra, ou non, faire l'IA ? « *Difficile de prévoir le futur. Mais je pense qu'on est davantage en train d'explorer ce que la machine peut résoudre, plutôt que ce qu'elle ne peut pas* », pose Geordie Williamson. D'autres sont plus optimistes : « *On se dit qu'il n'y a pas forcément de limites dans ce que la machine pourrait faire* », admet Thomas Hubert. « *Peut-être que si on continue sur cette lancée, on pourrait un jour atteindre les problèmes du millénaire. Mais il reste encore beaucoup de travail à accomplir* », projette même Sergei Gukov.
« *Si la machine devient si performante, j'aurai du mal à justifier de continuer la recherche* », concède Kevin Buzzard. Peut-être qu'alors il restera aux mathématiciens à trouver les futures conjectures intéressantes. Et aussi de se plonger dans le raisonnement de la machine : tout l'intérêt n'est pas de savoir si oui ou non la conjecture de Riemann est vraie, mais plutôt de comprendre pourquoi elle l'est. Alors, même si la machine envoie une démonstration longue de milliers de pages, il restera aux mathématiciens d'essayer de la comprendre. ■

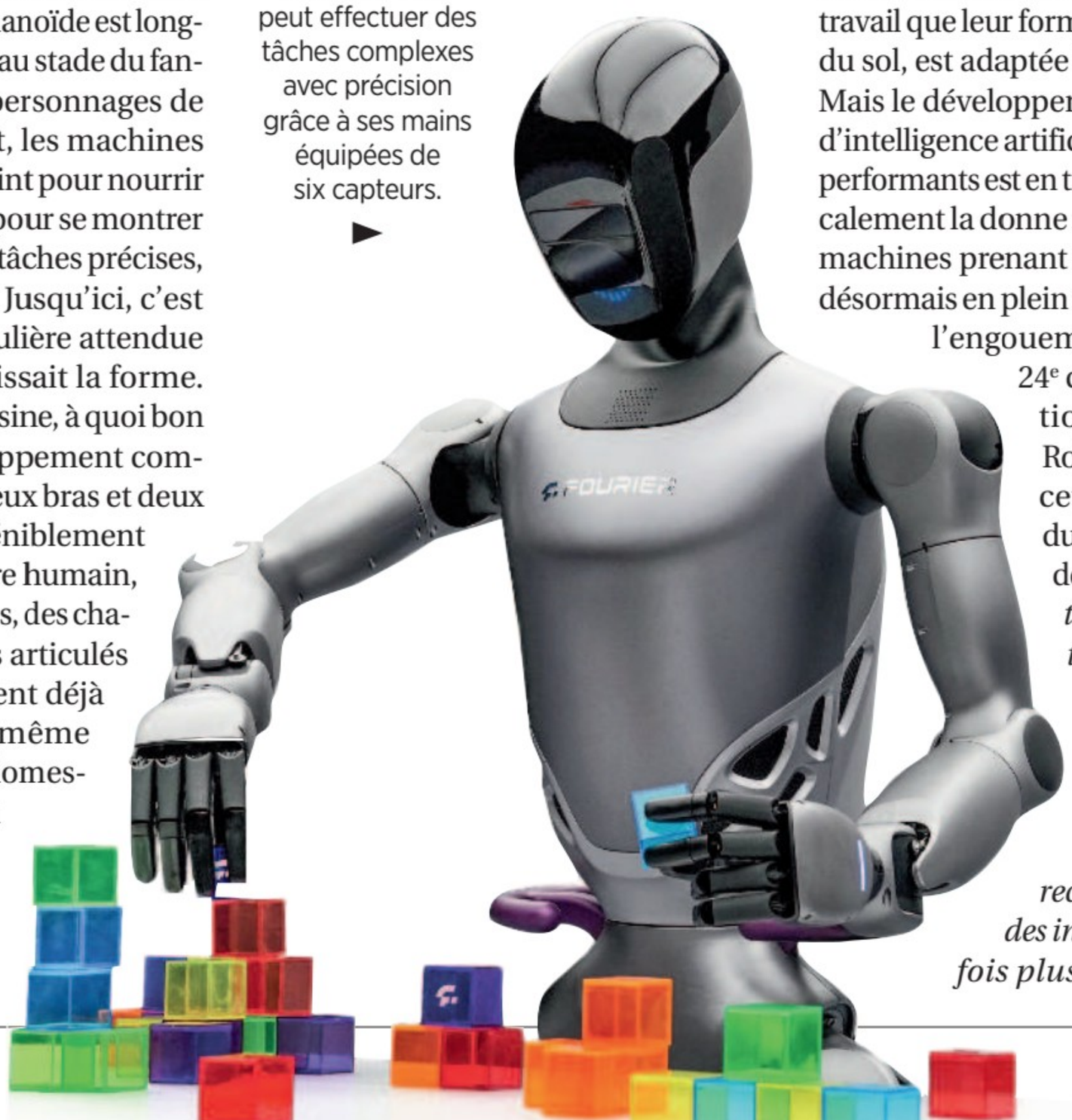
Charlotte Mauger

Le boom de la robotique humanoïde

Les progrès dans la conception d'humanoïdes, associés au développement de l'intelligence artificielle, pourraient avoir un impact dans de nombreux secteurs d'activité. Ces machines séduisent déjà aussi bien les laboratoires de recherche que les industriels.

Dans le très riche bestiaire de la robotique, l'humanoïde est longtemps demeuré au stade du fantasme calqué sur des personnages de science-fiction. De fait, les machines ne sont pas mises au point pour nourrir l'imaginaire mais bien pour se montrer performantes dans des tâches précises, répondre à un besoin. Jusqu'ici, c'est surtout la tâche particulière attendue du robot qui en définissait la forme. Pour automatiser une usine, à quoi bon investir dans le développement compliqué d'un bipède à deux bras et deux mains reproduisant péniblement la motricité fine de l'être humain, lorsque de grosses pinces, des chariots ou de grands bras articulés bien configurés s'avèrent déjà très efficaces ? De la même façon, côté robotique domestique, les tondeuses ou aspirateurs autonomes de type Roomba, qui ont rencontré un certain succès ces dix dernières années, font d'autant mieux le travail que leur forme, compacte et près du sol, est adaptée à leur mission.

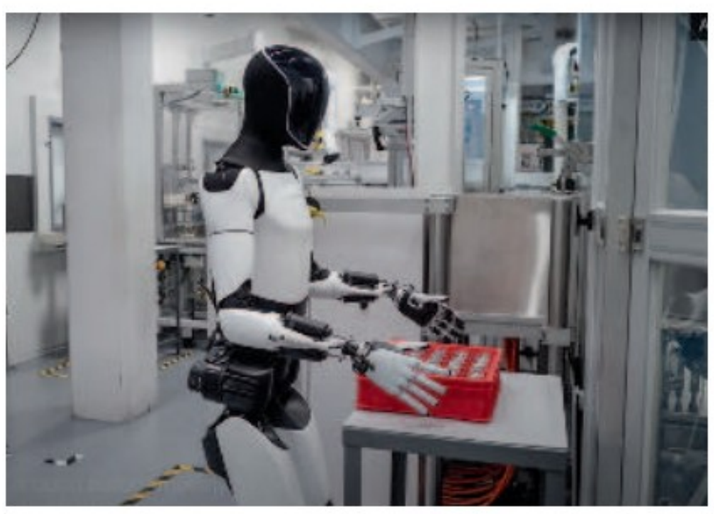
Fourier GR-2 peut effectuer des tâches complexes avec précision grâce à ses mains équipées de six capteurs. ►



FOURIER

Mais le développement d'algorithmes d'intelligence artificielle de plus en plus performants est en train de changer radicalement la donne : la mise au point de machines prenant forme humaine est désormais en plein boom. En témoigne l'engouement qu'a suscité la 24e conférence internationale Humanoids Robots qui s'est tenue cette année à Nancy du 22 au 28 novembre dernier. *« On note une très forte augmentation de l'intérêt pour les robots humanoïdes, aussi bien du côté purement scientifique des laboratoires de recherche que du côté des industriels. Il y a deux fois plus de participants à* ▶

Robotique



TESLA

Optimus est doté de modèles d'apprentissage machine afin d'adapter la force de sa prise en fonction des objets qu'il manipule.

cette conférence internationale qu'il y a deux ans à Okinawa, au Japon. Un cap a clairement été franchi », estime avec enthousiasme Jean-Baptiste Mouret, directeur de recherche à l'Inria (Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique), depuis la grande salle de 3 000 m² du centre des congrès Prouvé de Nancy, peuplée de dizaines de robots en démonstration.

Des investissements de centaines de millions d'euros

Cette année, Humanoids Robots a été couplé à la « coopétition » (compétition collaborative) européenne euROBIN de robotique qui rassemble, plus largement, humanoïdes mais aussi drones, robots à pattes, à roulettes… « *Tout le bestiaire de la robotique est présent !* » En tout, 32 équipes s'y sont affrontées lors d'épreuves de toutes sortes. 800 professionnels du secteur et une cinquantaine de robots venus de toute la planète ont ainsi animé la semaine. Les grands absents sont les mastodontes du secteur qui investissent à coups de centaines de millions d'euros dans leurs humanoïdes. À commencer par Atlas, développé par la société de robotique Boston Dynamics pour le compte de la Darpa, l'agence de recherche du département de la Défense des États-Unis. Depuis 2013, des vidéos sont régulièrement dévoilées pour montrer les progrès de cet humanoïde bodybuildé s'adonnant désormais au parkour — discipline sportive consistant à aller d'un point à un autre par le chemin le plus direct en franchissant les obstacles —, sautant de tous côtés, grimpant sur des échafaudages, déplaçant des charges lourdes… Des démonstrations certes très impressionnantes parfois, mais qui ne sont jamais réalisées en direct. De quoi rendre les chercheurs académiques méfiants. « *Difficile de juger ses réelles capacités d'adaptation dans ces conditions,* regrette Jean-Baptiste Mouret. *À combien de reprises a-t-il dû s'y prendre pour réaliser ces parcours de sauts et de déplacements ?* » Signe toutefois qu'Atlas pourrait bien avoir atteint l'âge de la maturité après dix ans d'essais, Boston Dynamics a annoncé en 2024 le lancement d'une nouvelle génération, passant d'un système hydraulique au 100 % électrique « *pour franchir une frontière commerciale* ». Une version qui doit être déployée sur les chaînes de production automobile de Hyundai Motor, société mère de Boston Dynamics depuis son rachat en 2021.

Une orientation stratégique qui semble calquée sur l'impulsion donnée par Elon Musk lorsqu'il a annoncé investir massivement sur Optimus, humanoïde développé par sa société Tesla. « *Elon Musk a déclenché quelque chose dans le secteur en mettant près d'un milliard de dollars sur la table. Cela a rendu les investisseurs plus confiants* », explique Jean-Baptiste Mouret. C'est ce qui a conduit une autre société américaine, Figure AI, créée en 2022, à se transformer en un autre géant du secteur en levant quelque 800 millions d'euros pour son robot avant d'acter un partenariat avec OpenAI au printemps 2024 pour équiper leur machine de son propre ChatGPT. Dans la foulée, la société a annoncé le déploiement de sa flotte dans une usine BMW de Caroline du Sud (États-Unis). « *On a surtout le sentiment que les constructeurs automobiles se calquent sur Tesla pour éviter d'avoir l'air à la traîne* », analyse le chercheur pour expliquer cette appétence des géants de la robotique pour

SÉCURITÉ

Le risque du hacking

En octobre dernier, un groupe de pirates informatiques s'est livré à une attaque sur le fabricant de robots aspirateurs Ecovacs. Ils sont parvenus à détourner les haut-parleurs des machines pour leur faire proférer des insultes racistes au beau milieu du salon… Un modeste aperçu de ce qui pourrait arriver si des robots domestiques à tout faire investissaient les foyers. Une perspective probable désormais. Une enquête menée par la société de hackers éthiques IOActive sur des objets de domotique a montré qu'*a minima*, il serait notamment possible d'espionner la maisonnée. Inutile de dire qu'avec des robots humanoïdes puissants, les mesures de sécurité devraient être drastiques avant de les accueillir à la maison.

les chaînes de production automobile. Une industrie pourtant déjà largement automatisée. Or, c'est sur les secteurs qui ne le sont pas encore que la « révolution IA » à laquelle on assiste depuis près de dix ans devrait avoir le plus d'impact. C'est en tout cas cette logique qui préside au nouveau succès de la robotique humanoïde : incarner l'intelligence artificielle.

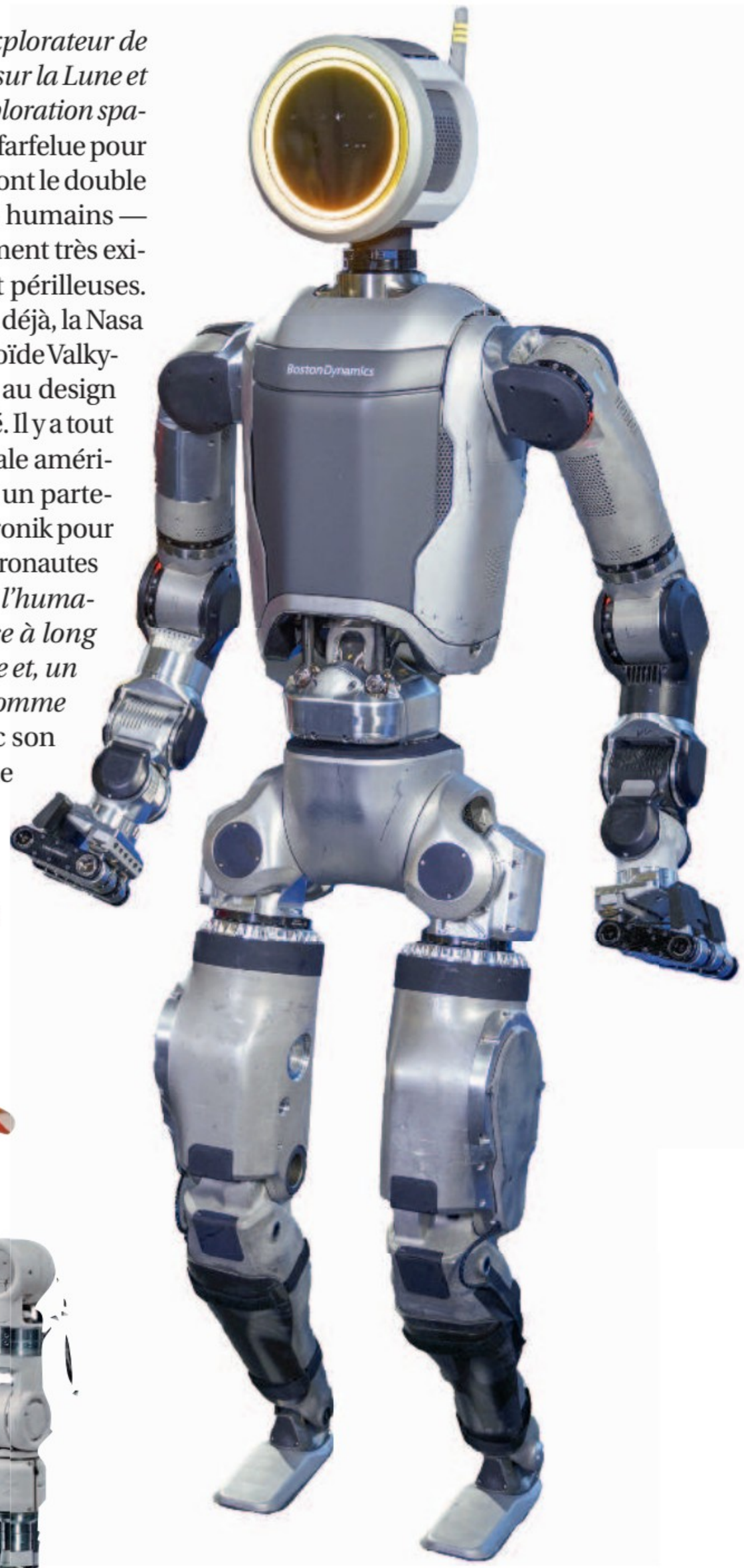
Du désamiantage à l'aide à domicile

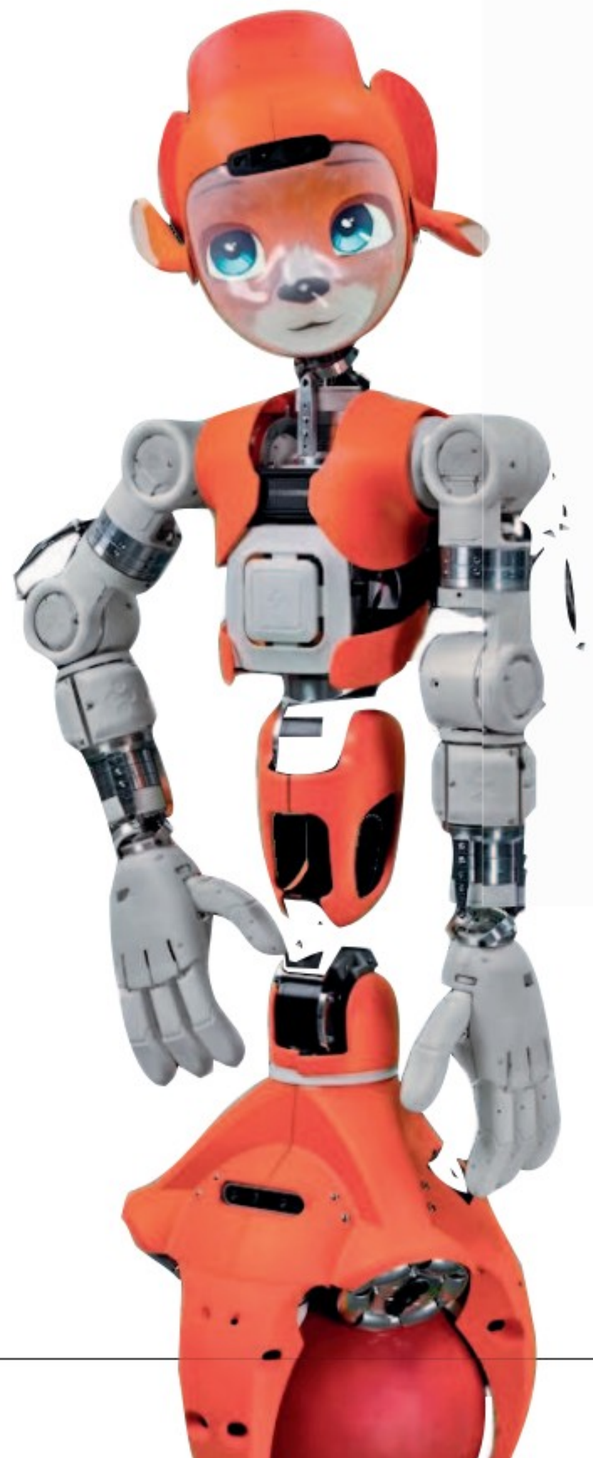
De fait, les algorithmes d'apprentissage ont réalisé ces dernières années des progrès remarquables, permettant de faire sauter les verrous : *« Manipuler des objets mous, par exemple, a longtemps été un défi,* explique Jean-Baptiste Mouret, *mais aujourd'hui, même des bras de qualité médiocre avec du jeu dans les jointures peut y parvenir. C'est ce que fait la start-up Physical Intelligence avec des bras robotiques à faible coût de fabrication, capables de plier le linge.* » Enfin, et surtout, *« l'émergence d'IA génératives très généralistes comme ChatGPT, permettant de dialoguer avec la machine presque comme avec un humain, a rendu l'idée de robots polyvalents beaucoup plus pertinente »*, poursuit le scientifique.

Désormais, les chercheurs imaginent une multitude de tâches que les machines pourraient prendre à leur compte, que ce soit parce qu'elles sont dangereuses ou parce que la main-d'œuvre manque : désamiantage, aide à domicile ou dans les Ehpad, petits travaux, nettoyage… Depuis octobre dernier, l'Institut du cancer à Montpellier accueille ainsi les sympathiques robots Miroki et Miroka de la start-up française Enchanted Tools dans son service de radiothérapie pédiatrique. Celui-ci doit apporter une présence familière et réconfortante aux enfants lors de leur hospitalisation, en consultation et lors de leurs séances de radiothérapie où aucune présence humaine dans la salle n'est possible.

De son côté, Serena Ivaldi, également directrice de recherche en robotique à l'Inria, *« rêve d'un robot explorateur de planète, qui pourrait aller sur la Lune et au-delà pour accélérer l'exploration spatiale »*. Une idée loin d'être farfelue pour des missions spatiales qui ont le double inconvénient — pour des humains — de nécessiter un entraînement très exigeant et d'être hautement périlleuses. Au milieu des années 2010, déjà, la Nasa avait présenté son humanoïde Valkyrie de 1,90 m pour 125 kg, au design d'astronaute futuriste léché. Il y a tout juste un an, l'agence spatiale américaine annonçait cette fois un partenariat avec la société Apptronik pour faire du robot Apollo des astronautes assistants pouvant *« aider l'humanité à établir une présence à long terme sur la surface lunaire et, un jour, sur d'autres planètes comme Mars »*. Nul doute qu'avec son Optimus, Elon Musk, qui ne jure que par *« la vie extra-planétaire »*, a lui aussi la chose bien en tête. ■

Hugo Jalinière





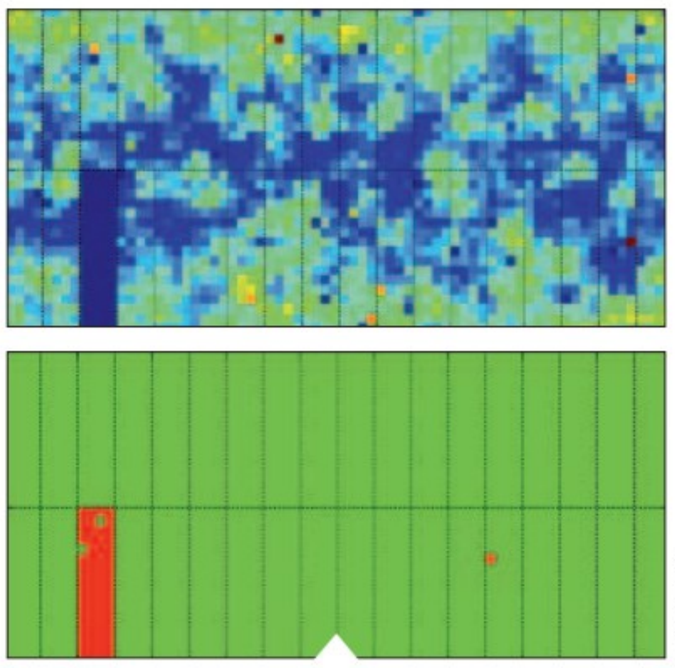
ENCHANTED TOOLS - SIPA

Avec son design aux allures de personnage de dessin animé, **Miroka** (à gauche) accompagne les jeunes patients traités à l'Institut du cancer à Montpellier. La nouvelle version d'**Atlas** (ci-dessus) est destinée à être utilisée sur les chaînes de production de Hyundai.

Un outil pour scruter l'Univers et la matière

Cartographie des galaxies, chasse aux nouvelles particules : l'intelligence artificielle accélère le traitement des données, peaufine les simulations, mais elle ne permet pas encore de découvertes originales… faute de créativité.

De l'infiniment petit à l'infiniment grand, l'IA s'impose peu à peu comme un outil précieux pour explorer les mystères de l'Univers comme ceux de la matière. Ainsi, le programme DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument) consiste à cartographier 40 millions de galaxies et de quasars (des noyaux de galaxies très brillants) afin de reconstruire l'histoire de l'expansion de l'Univers sur près de 11 milliards d'années. Les relevés sont réalisés à partir d'un instrument installé à l'observatoire de Kitt Peak, en Arizona (États-Unis), capable de saisir 5000 cibles d'un coup. Mais encore faut-il les choisir. « *Il a fallu sélectionner des galaxies couvrant l'ensemble de la tranche d'Univers qui nous intéresse,* explique Nathalie Palanque-Delabrouille, cosmologiste au CEA et porte-parole de la collaboration DESI. *Nous avons réalisé une optimisation entre les galaxies proches, les plus lointaines, les quasars les plus brillants… Pour faire ce tri considérable, nous avons recouru à des algorithmes d'intelligence artificielle. Cela a permis, par exemple, d'améliorer de 20 à 30 % la qualité de sélection des quasars.* »

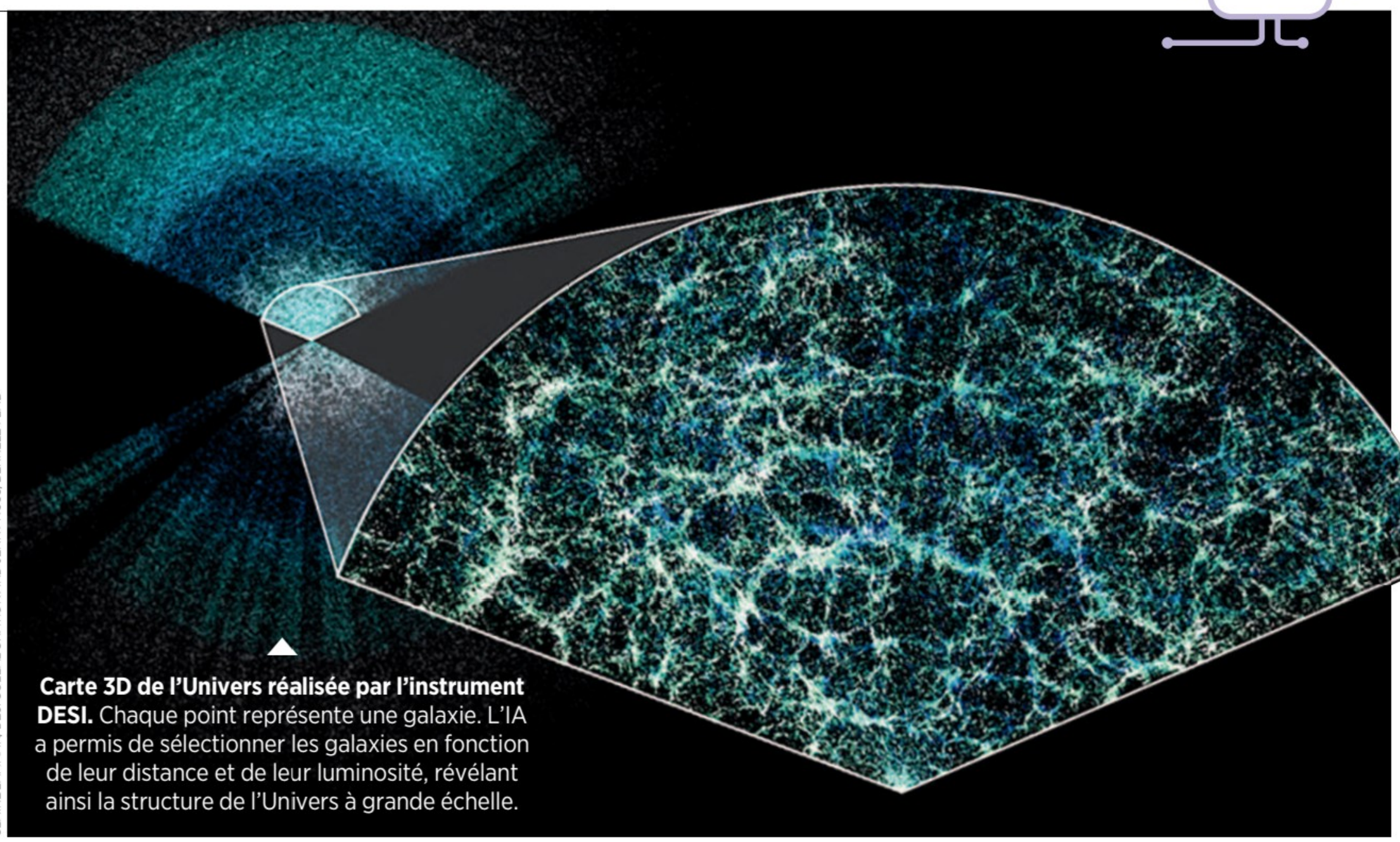

CMS/ CERN

Grâce au « machine Learning », une anomalie dans la prise de données au LHC (Cern) est repérée sur l'image du haut, et signalée en rouge (en bas).

L'intelligence artificielle est également employée afin de corriger la carte de l'Univers des imperfections dans les images utilisées pour la sélection des cibles. « *Pour interpréter les données et reconstituer l'organisation des galaxies à très grande échelle, nous avons besoin d'une imagerie de grande qualité. Les algorithmes de type* machine learning *apportent une meilleure correction des inhomogénéités photométriques* [dues notamment aux perturbations atmosphériques] *que les approches traditionnelles.* »

Une utilité dans l'amélioration du traitement de l'image

Un autre programme phare de l'astronomie, le télescope spatial James-Webb (JWST), utilise aussi l'IA, mais avec modération, résume Hakim Atek, astronome à l'Institut d'astrophysique de Paris, spécialiste de l'histoire des galaxies et très impliqué au sein du JWST. « *C'est un outil qui permet d'accélérer certaines analyses, comme la reconnaissance des formes de galaxies, ou d'améliorer le traitement de l'image, en faisant ressortir une galaxie du bruit de fond ambiant qui la masque. Mais l'IA ne s'impose pas tant que cela, car le volume de données généré par les instruments du JWST reste à taille humaine.* » Le chercheur souligne toutefois que « *ce n'est pas la même chose pour d'autres instruments comme le radiotélescope SKA* [installé en Australie, il traque aussi l'origine des étoiles et des galaxies, mais dans une autre gamme de fréquences que le



CLAIRE LAMMAN/DESI COLLABORATION AND JENNY NUSS/BERKELEY LAB

Carte 3D de l'Univers réalisée par l'instrument DESI. Chaque point représente une galaxie. L'IA a permis de sélectionner les galaxies en fonction de leur distance et de leur luminosité, révélant ainsi la structure de l'Univers à grande échelle.

JWST], *ou Euclid* [télescope spatial spécialisé dans l'étude de la matière noire et de l'énergie noire], *qui en génèrent beaucoup plus.* »

En physique des particules, l'usage de l'IA est plus systématique, et prend une place de plus en plus importante, comme l'explique Simon Akar, physicien des particules à l'université Clermont Auvergne et membre de l'expérience LHCb au Cern, à Genève (Suisse). « *Le LHC* [collisionneur de particules du Cern à la frontière franco-suisse], *c'est 40 millions de croisements de faisceaux de protons par seconde. Chaque rencontre peut engendrer des dizaines de collisions protons/protons, d'où jailliront des flopées de particules. Cela crée plusieurs centaines de téraoctets de données par seconde* [l'équivalent de 20 000 films en HD]. » Le flux est tel qu'il est impossible de tout garder et une sélection drastique des événements à enregistrer avant analyse est nécessaire. « *L'IA, qui excelle dans la catégorisation d'événements, permet une amélioration significative des performances de sélection.* »

Les « événements intéressants » sont tous ceux susceptibles de révéler l'existence d'une « nouvelle physique » : des interactions ou bien des particules encore inconnues, prenant ainsi en défaut le modèle standard de la physique des particules.

Débusquer des événements à partir d'hypothèses fournies à l'IA

Les scientifiques utilisent l'IA pour débusquer des événements précis, à partir d'hypothèses qu'ils auront faites et fournies à l'IA. Toutefois, le développement de cet usage se heurte à l'opacité des modèles, particulièrement des réseaux de neurones, qui ne fournissent pas d'explications claires sur les critères qu'ils utilisent. « *Cela pose des problèmes d'interprétabilité,* résume Simon Akar. *On ne sait pas comment l'IA "travaille", quelle fonction elle construit et utilise pour parvenir à un résultat. Il est difficile, dans ces conditions, de calculer des incertitudes, et donc de valider le résultat…* »

Et quelle est la faculté de l'IA à réaliser une authentique découverte que les physiciens n'auraient pas anticipée ? « *Il se développe désormais des algorithmes d'apprentissage non supervisé qui peuvent identifier des signaux exotiques ou des anomalies dans les données,* constate Simon Akar. *Mais ces outils servent surtout à pointer des événements inhabituels à examiner, pas à conclure sur une découverte, qui reste l'apanage des chercheurs.* »

Une prudence que partage François Vannucci, physicien des particules émérite et auteur de nombreux ouvrages de vulgarisation (dernier paru : *La Promesse du hasard*, éd. Odile Jacob). Selon lui, l'IA introduit une forme de révolution conceptuelle en physique. « *Depuis Galilée, la méthode scientifique consiste à observer les phénomènes, conceptualiser une loi et vérifier ensuite qu'elle est en accord avec les mesures. Avec l'IA, on cherche toujours à décrire l'évolution d'un système, mais de manière probabiliste, sans comprendre ce qu'il y a derrière.* » Il doute ainsi qu'elle débouche un jour sur de grandes découvertes. « *Pour cela, l'IA manque de ce que le philosophe Pascal appelait l'esprit de finesse : l'inventivité, l'imagination, l'intuition.* » Conquérir cet « esprit de finesse », voilà donc le prochain défi de l'intelligence artificielle… ■ **Fabrice Nicot**

STEVE DOLAN/JOHN DEERE

Les consoles intégrées sur les machines agricoles affichent de nombreuses données (intrants, travail du sol, etc.) afin de répondre aux besoins spécifiques des plantes et d'optimiser le rendement des cultures (ici une moissonneuse connectée aux États-Unis).

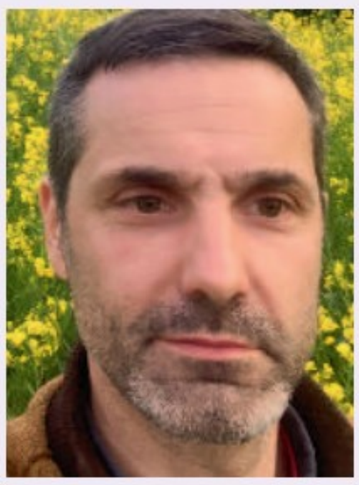
Agriculture

Les fermes connectées gagnent du terrain

L'IA peut apporter un service essentiel aux agriculteurs comme outil d'aide à la décision pour la prédiction météo, la connaissance de l'état des sols, la croissance des plantes et le risque de maladies. Des promesses de réduction de la charge de travail et d'amélioration des rendements qui font déjà des émules.

Par Loïc Chauveau

Peut-on mettre un ordinateur au pis de chaque vache, une équation au pied de chaque épi de blé, un algorithme derrière chaque motte de terre ? Il semble que oui, à écouter les nombreuses entreprises du numérique présentes dans le secteur agricole. Ces start-up investissent aussi bien l'univers des champs que celui des étables, en offrant aux exploitants des outils clés en main pour gérer des entreprises de plus en plus complexes. Au point que l'intelligence artificielle a fait une entrée tonitruante au Salon international de l'agriculture de 2024, signifiant ainsi spectaculairement que les puces allaient envahir les fermes. Les 26 et 27 février, huit équipes s'étaient en effet affrontées dans une des salles du salon, *« vitrine de la ferme France »* selon le terme consacré. Ces informaticiens, qui travaillent autant dans des start-up du secteur que dans de grandes entreprises liées à l'agriculture, devaient fournir des solutions numériques à des questions cruciales posées par des agriculteurs témoins. Les résultats de ce « hackathon » n'ont pas encore été diffusés mais l'organisateur de la manifestation, l'association la Ferme digitale, a déjà annoncé que ce concours deviendrait pérenne. Il y aurait tant à inventer ! *« Nous en voulons pour preuve que notre association créée il y a huit ans par cinq start-up comprend aujourd'hui 170 entreprises employant plus de 3000 salariés »*, s'enthousiasme Romain Faroux, coordinateur de l'association.


SÉBASTIEN NEVEU

ENTRETIEN

SÉBASTIEN NEVEU

AGRICULTEUR

« Un outil indispensable pour tirer le meilleur profit de ma récolte »

Sébastien Neveu, 47 ans, gère avec un associé 330 hectares de grandes cultures dans l'Yonne. Pour rendre son exploitation plus solide face aux aléas climatiques et aux difficultés économiques, l'agriculteur a décidé de passer ses rotations de cultures de trois à neuf ans, en intégrant des légumineuses (lentilles, pois d'hiver, luzerne), et de pratiquer l'agriculture de conservation en cessant le labour de ses terres. Il place beaucoup d'espoir dans l'utilisation de l'intelligence artificielle.

Comment l'IA s'est-elle insérée dans la gestion de votre exploitation ?

Sans que j'en sois vraiment responsable. Le premier apport de l'intelligence artificielle provient des semenciers. Avec l'utilisation du séquençage de génomes, mes fournisseurs de semences me proposent des variétés bien mieux adaptées à mes conditions climatiques et à mes sols. Indirectement, je profite de leurs investissements dans ces nouvelles méthodes de sélection.

Et dans la conduite de vos cultures ?

Mon exploitation comprend un réseau de capteurs météo tous les 3 à 4 kilomètres, connecté à une station locale qui couvre un rayon de 20 kilomètres. J'ai ainsi, sur mon téléphone, un conseil à la parcelle pour les interventions sur les cultures. Je ne suis pas dans une région d'irrigation, mais j'ai besoin de modèles météo qui me donnent des indications au-delà des trois à quatre jours de prévisions fiables. À l'avenir, je pense coupler ce service avec les logiciels sur la santé des plantes, les applications d'engrais, les attaques de ravageurs, etc.
La reconnaissance des mauvaises herbes par caméra devrait notamment faire beaucoup baisser mon usage des pesticides.

Quel est l'intérêt pour la gestion de votre exploitation ?

C'est là que se trouve le principal avantage. Je passe un contrat avec une start-up appelée Piloter sa ferme, qui collecte des données auprès de tous les marchés mondiaux, comme celui de Chicago (États-Unis), ou Rouen et Creil, en France. Ils me fournissent les tendances des marchés et tous les 15 jours produisent une analyse incluant l'ensemble des critères qui influent sur le prix des céréales, ce qui me permet de savoir précisément quels volumes et à quelle échéance je dois mettre en vente ma récolte pour en retirer le meilleur profit. C'est un service éminemment rentable. ■

Propos recueillis par L. C.

▶ Quels espoirs les agriculteurs mettent-ils dans l'intelligence artificielle ? « *Il y a au moins deux domaines où l'IA peut apporter un service essentiel : la prédiction associant météo, connaissance de l'état des sols, croissance des plantes, risque de survenue de maladies, etc. ; et ce qui découle de toutes ces données, à savoir l'aide à la décision* », détaille Jean-Pierre Chanet, chercheur au département mathématiques et numérique de l'Institut national de recherche sur l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae). La liste des possibilités est en effet longue : surveillance en temps réel des cultures, prédiction de leurs rendements, calibrage des besoins en irrigation, optimisation de la lutte contre les ravageurs, raisonnement des applications d'engrais, suivi de la santé du bétail, traçabilité des chaînes d'approvisionnement agricoles et des produits sortant de la ferme, gestion au jour le jour de l'exploitation et assistance pour répondre aux demandes réglementaires. Les capteurs, sondes, drones, GPS, robots de traite, satellites fournissent ainsi en données un univers numérique dont on peut penser qu'il offre une vision la plus réelle possible du fonctionnement des cultures et des élevages.

Traduire en messages simples l'analyse de données complexes

Les membres de la Ferme digitale développent ainsi des algorithmes puissants qui fournissent des informations permettant aux agriculteurs de conforter par des données objectives les décisions prises auparavant à partir de leur expérience et leur savoir. Ainsi, la société MyEasyFarm propose une plateforme intégrant des modèles d'apprentissage capables d'analyser des données satellitaires, météorologiques, pédologiques, agronomiques pour capturer les interactions complexes qui font que les plantes poussent plus ou moins bien. « *Ces données sont aujourd'hui disparates et nous mettons donc un accent particulier sur l'intégration d'informations précises sur les sols pour comprendre les*

LYDIE LECARPENTIER/REA

Le robot électrique Dino de Naïo Technologies désherbe mécaniquement en toute autonomie les cultures maraîchères et permet d'éviter l'usage de pesticides.

WEENAT

Les capteurs de Weenat fournissent aux agriculteurs un suivi en temps réel, par simple message sur leur smartphone, de la teneur en eau des sols cultivés.

cycles de leurs éléments nutritifs et leurs apports aux cultures », précise la jeune société. L'objectif est donc de créer un outil numérique à partir d'une masse de données complexes provenant de nombreuses sources dont les résultats puissent être traduits dans des messages simples, disponibles en temps réel sur les smartphones des utilisateurs.

Membre fondatrice de la Ferme digitale, l'entreprise nantaise Weenat s'extrait même de la dimension de la parcelle ou de la ferme pour s'étendre à l'échelle de l'Europe. Weenat est spécialisée dans la fourniture de capteurs qui transmettent par GPS la teneur en eau dans les sols pour les parcelles équipées. Les données sont traitées par des informaticiens aptes à traduire les données récoltées en messages que l'agriculteur reçoit en retour sur son smartphone. En dix ans, avec l'installation de 20 000 capteurs de l'Espagne à l'Allemagne (6000 en France), l'entreprise a acquis une double connaissance : l'état d'humidité des sols dans un nombre important de régions et les mécanismes en jeu dans le sol et au sein de la plante lorsqu'une terre s'assèche. Son programme Weedriq combine ainsi les informations historiques et en temps réel de ses capteurs avec les prévisions météo locales afin de simuler sur sept jours l'évolution des besoins des plantes. L'entreprise de 60 salariés (dont 40 informaticiens) assure avoir fait économiser l'an dernier 32 millions de mètres cubes d'eau à ses utilisateurs. *« Nous ne cessons de multiplier les points de collecte de données, si bien que désormais nous pouvons proposer à l'ensemble des agriculteurs européens ce service sans qu'ils aient besoin d'équiper leur exploitation avec nos capteurs* », affirme Jérôme Le Roy, fondateur de Weenat. Ce projet baptisé Meteoria est doté de 2,5 millions d'euros par la Banque publique d'investissement (BPI) et l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), et bénéficie de la coopération de l'Agence spatiale européenne (ESA) et du Centre national d'études spatiales (Cnes).

Des machines qui sont capables de travailler seules

Les applications ne sont pas qu'agronomiques. Le secteur de la robotique utilise à plein les possibilités de l'apprentissage des machines en leur montrant comment différencier les mauvaises herbes des cultures, tout en étant guidé par GPS pour respecter les rangs de semis. Par exemple, le petit désherbeur de Naïo Technologies se déploie depuis dix ans chez les maraîchers et les viticulteurs. *« Ces nouvelles machines savent désormais travailler seules pour désherber une parcelle, ce qui laisse du temps à l'agriculteur pour faire autre chose,* plaide Romain Faroux. *C'est un ser-*

vice précieux quand on a décidé de se passer de pesticides. Le désherbage à la main prend en effet beaucoup de temps et d'énergie. »

Le monde des coopératives, négoces, agro-industries est également sollicité par une nouvelle offre de mise en relation d'écosystèmes numériques qui aujourd'hui ne se parlent pas. Ainsi, la société Perfarmer propose l'interopérabilité entre l'ensemble des logiciels agricoles. « *Imaginez Julien, un agriculteur, recevant en temps réel sur son téléphone toutes les données de sa benne de blé à peine livrée à la coopérative (tonnage, poids spécifique, humidité…). Et imaginez Marie, responsable du service céréales, pouvant accéder à ces mêmes informations depuis le service informatique de la coopérative sans avoir réalisé la moindre saisie manuelle et ce, grâce uniquement à l'interopérabilité des appareils en service !* », promeut la start-up.

Un service de suivi de la commercialisation

Ce suivi des opérations menées sur une récolte du champ jusqu'au consommateur en passant par sa transformation n'est pas encore une réalité. Mais elle intéresse une agro-industrie contrainte de renforcer la traçabilité des produits qu'elle utilise. À l'inverse, l'intelligence artificielle peut faciliter la vente en direct, affirme-t-on à la Ferme digitale. « *La gestion d'une exploitation est déjà très complexe, aussi ces nouveaux services peuvent dégager l'exploitant du suivi d'une commercialisation de produits vendus à la ferme* », assure Romain Faroux.

STUDIOAH

« Notre stratégie s'appuie clairement sur l'intelligence artificielle pour le développement de l'agroécologie »

Jérôme Le Roy, fondateur de la start-up nantaise Weenat, membre de l'association la Ferme digitale

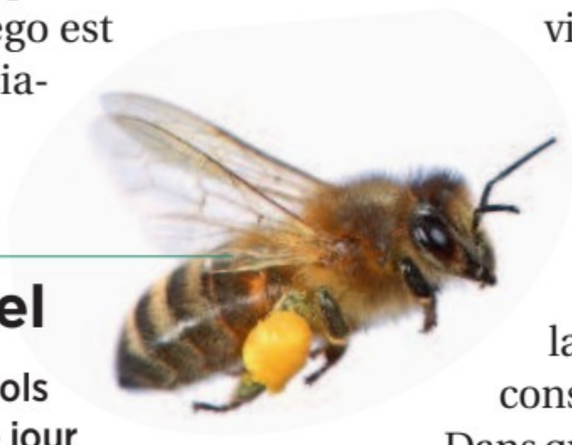
Ces deux usages possibles montrent bien l'ambiguïté de ce que l'on peut attendre de l'IA. Va-t-elle renforcer la spécialisation des exploitations agricoles et donc la tendance actuelle à la concentration des productions, la diminution du nombre de fermes, l'agrandissement des exploitations ou bien, au contraire, favoriser la transition agroécologique prônée par la recherche agronomique et les climatologues ? « *Pour nous, il n'y a pas débat. Notre stratégie sur vingt ans s'appuie clairement sur le développement de l'agroécologie* », assure Jérôme Le Roy. L'intelligence artificielle pourrait ainsi aider les agriculteurs à faire face à la plus grande complexité des nouveaux systèmes de défense des cultures pour se débarrasser de la chimie, condamnée à terme pour ses impacts sur la biodiversité. Ainsi, Agreego est une société spécialisée dans le biocontrôle qui utilise des drones pour vérifier l'état des cultures, détecter les attaques de ravageurs et diffuser, toujours par drone, les parasites de ces insectes. La société est spécialisée dans l'épandage à bon escient de trichogrammes, des hyménoptères qui pondent dans les larves de ravageurs redoutés comme la pyrale du maïs ou le carpocapse de la pomme.

L'IA en agriculture serait ainsi pleine de promesses : réduction de la charge de travail de l'agriculteur, meilleure efficacité des traitements et amélioration des rendements, rationalisation de la commercialisation des produits. Mais il y a des risques. Si aujourd'hui, dans sa prise de décision, un agriculteur contrôle les paramètres, ce ne sera peut-être plus le cas quand le smartphone aura rendu son verdict. La conduite d'une culture peut-elle être confiée à un outil dont on ne connaît pas les critères de fonctionnement ? « *C'est aux fournisseurs de service d'apporter des garanties* », prévient Romain Faroux. De même, la propriété des données peut poser problème. C'est le cas des robots de traite qui se multiplient en France. Les données sur la production et la qualité du lait sont souvent captées par les constructeurs des machines.

Dans quelle mesure l'IA va-t-elle modifier le visage de l'agriculture ? Et quelles solutions peut-elle apporter à la crise actuelle que vivent les exploitants ? Dans un système de production alimentaire en plein dysfonctionnement, difficile d'imaginer que les algorithmes puissent résoudre les problèmes actuels. Mais ils pourraient être une part de la solution. ■

APICULTURE

Des abeilles surveillées en temps réel


K. TAYLOR/ NATUREPL/ EBPHOTO

Quand une ruche est affectée par un pesticide chimique, les vols des abeilles diminuent de 25 %. Mais cet impact n'est pas à ce jour détectable immédiatement. À partir de 42 000 enregistrements de vol de 1107 abeilles témoins et de 1689 abeilles exposées aux pesticides équipées de puces RFID, les chercheurs de l'Inrae et de l'université de Mexico (Mexique) ont pu construire un système d'alerte au risque sanitaire. Créé pour ce seul usage, le modèle d'intelligence artificielle utilisé identifie le changement de comportement en vol des insectes avec un degré de précision de 99 %. Ces résultats publiés dans *Ecological Informatics* ouvrent la voie à la création d'un système d'alerte en temps réel d'exposition des abeilles mellifères à un risque toxique.

ATLAS IGN 2024

◄ Le modèle d'apprentissage profond du projet OCS GE classe automatiquement les différentes zones à partir d'une vue aérienne (ici au Conquet) : bâtiments (en rouge), terres labourées et cultures (jaune et orange), surfaces herbacées (vert), feuillus et conifères (vert foncé), zones imperméables (marron).

Un œil numérique décrypte les sols

L'IGN développe une IA qui va mesurer l'artificialisation du territoire à partir de prises de vues aériennes en haute résolution. Un autre projet prévoit de déterminer avec précision l'emprise de la forêt.

De quoi est composé le territoire français aujourd'hui ? Comment sont occupés ses sols ? Comment ont-ils évolué depuis 10 ans, 50 ans ou un siècle ? Et comment se transformeront-ils demain ? Les indicateurs sont nombreux : artificialisation des sols, surface et composition des forêts, recul des côtes, intensification agricole aussi. Mais face à l'urgence climatique, *« nous avons besoin de nouvelles descriptions du territoire qui soient systématiques, détaillées et fiables afin d'observer finement chaque évolution pour éclairer l'action publique »*, estime Matthieu Porte, coordinateur des activités IA de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). Depuis sa création en 1940, l'IGN a toujours misé sur l'alliance de compétences humaines d'analyse et d'interprétation, et de technologies. Aujourd'hui, il dispose d'une capacité d'observation élargie grâce au croisement d'images satellitaires, aériennes ou de lidar haute densité *(lire l'encadré p. 61)*. Et pour analyser toutes ces données en continu, l'IA joue désormais un rôle décisif.

« Prenons un cas emblématique chez nous : le suivi de l'occupation des sols, détaille Matthieu Porte. *Pour faire de l'IA un outil puissant, nous allons créer des algorithmes capables de lire des clichés du territoire, et donc d'en décrire la composition. Nos experts de l'analyse photographique savent faire cette description sur quelques centaines ou milliers de kilomètres carrés. Demain, les algorithmes vont permettre de l'étendre à la totalité du territoire national et de le faire beaucoup plus régulièrement. »*

Deux projets majeurs illustrent cette ambition. Le premier, baptisé OCS GE (occupation du sol à grande échelle), a pour but de mesurer l'artificialisation ▶

ATLAS IGN 2024

Une carte de France d'exposition aux feux de forêt a été établie grâce à des algorithmes à partir d'images satellitaires et de données météo et de terrain. Elle permet aux services d'incendie et de secours de repérer les habitations trop proches d'une végétation dense (en rouge) et celles situées à plus de 50 mètres d'un couvert végétal (en vert), donc moins à risque.

du territoire avec des mises à jour tous les trois ans. Il consiste à développer un modèle d'apprentissage profond à partir de données « socles » issues de prises de vue aériennes en haute résolution, pour classer de manière automatique les zones selon 16 natures de couverture différentes (forêt, terre agricole, bâti…). Une fois cette description faite, elle est croisée avec d'autres données, comme celles des fichiers fonciers transmis par le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema). Non seulement ce projet offre une mesure plus exhaustive de l'artificialisation des sols, mais il a également pour ambition de répondre à un autre défi : identifier les zones dites de non-changement. Car le taux de changement sur une période de trois ans est estimé à 1 % de la surface du territoire. Tout reprendre à chaque fois n'a donc pas de sens.

Le temps d'actualisation des cartes divisé par trois

L'autre projet concerne la cartographie forestière nationale que produit l'IGN. En s'appuyant toujours sur l'apprentissage profond, un « masque forêt » a pu être créé pour déterminer avec précision l'emprise de la forêt et ce qui n'en fait pas partie. Il est opérationnel depuis mai 2024 dans le cadre du lancement de la nouvelle version de cette cartographie. *« La précédente version a été un très grand chantier chez nous : il nous a fallu dix ans pour le mener à bien ! S'appuyer sur l'intelligence artificielle va nous permettre de diviser au moins par trois ce délai »*, souligne Matthieu Porte. Ce « masque forêt » n'a pas vocation à servir aux seuls chercheurs de l'IGN, mais à tous les professionnels de la filière du bois comme aux acteurs de l'environnement et de l'aménagement. C'est pourquoi la version bêta (non encore aboutie) est déjà en accès libre *.

Pour Arnaud Braun, coordinateur du projet BD Forêt v3, ce travail n'était qu'une *« première étape importante avant de chercher à descendre encore un peu plus bas vers le sol et à identifier les différentes essences d'arbres qui constituent les forêts. Pour cela, l'IA intégrera des images régulièrement mises à jour issues des prises de vue satellitaires Sentinel-2, ce qui autorise la compréhension de la saisonnalité qui régit le vivant, ainsi que les données lidar HD, qui ouvrent la compréhension par la machine de la forme des arbres. »*

Reste que pour que les algorithmes soient efficaces, ils doivent être entraînés à partir de données d'apprentissage adaptées. Et sur ce point, l'IGN dispose d'un atout non négligeable : sa capacité à produire des jeux de données massifs, diversifiés et de qualité. *« Avec 2 milliards de pixels, 980 kilomètres car-*

IGN

« Nous allons créer des algorithmes capables de lire des clichés du territoire, et donc d'en décrire la composition »

Matthieu Porte, coordinateur des activités IA de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN)

rés d'images annotées pour en décrire l'occupation des sols, le jeu de données ouvertes Flair était, par exemple, à sa publication l'un des trois plus riches du monde avec DeepGlobe (Facebook, MIT) et LoveDA (université de Wuhan, en Chine) », s'enthousiasme le coordinateur IA de l'IGN. *Idem* pour le jeu de données PureForest qui, avec 135 000 images lidar de 50 m² couvrant 449 forêts issues de 40 départements, constitue le plus grand jeu de données lidar à l'international sur les essences forestières.

Cet atout est indispensable pour observer l'occupation des sols et son évolution, car le modèle d'IA mis à l'œuvre doit être capable de fonctionner de manière fiable sur l'ensemble du territoire national. Il doit donc être en mesure de différencier les environnements urbains et naturels en fonction du type de toiture, des composants de la végétation et même de la saison. Le massif des Vosges n'aura pas le même aspect en hiver qu'à la fin du printemps par exemple, et l'IA devra pourtant le reconnaître. Il faut donc nourrir le modèle d'apprentissage d'échantillons très variés. *« La photo-interprétation est une expertise très pointue, en particulier en milieu forestier. Chez nous, on compare les spécialistes à des radiologues de la photo aérienne ! Sans leur expertise de départ, il nous serait impossible de créer des IA pertinentes* », estime Matthieu Porte.

Ultime ambition : un jumeau numérique de la France

L'IGN n'agit pas seul pour cartographier l'anthropocène. Il a ouvert ses jeux de données, ses données d'apprentissages et même ses codes algorithmiques d'IA permettant de les exploiter pour lancer des projets en partenariat avec d'autres acteurs de la recherche. *« Deux sont particulièrement importants,* décrit Matthieu Porte. *Le premier, c'est notre partenariat avec Genci* [Grand Équipement national de calcul intensif] *et le CNRS, qui nous permet d'exploiter les capacités du supercalculateur Jean-Zay* [le plus puissant supercalculateur français dédié à la recherche]. *Avoir accès à cette puissance de calcul facilite et accélère l'entraînement de nos modèles. Par ailleurs, CarHab est un programme très ambitieux mené dans le cadre des politiques européennes de protection de la biodiversité, pour lequel nous travaillons en lien étroit avec les conservatoires botaniques. Cette alliance démontre l'intérêt de croiser les expertises pour créer des IA vraiment utiles.* » CarHab vise en effet à produire d'ici à 2026 une cartographie nationale prédictive des habitats naturels et semi-naturels : c'est-à-dire tout milieu réunissant les conditions physiques et biologiques nécessaires à l'existence d'une espèce animale ou végétale.

Ultime ambition : le projet de jumeau numérique de la France et de ses territoires, lancé en mai dernier par l'IGN, le Cerema et l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria). Ici, l'IA jouera un rôle central pour exploiter les millions de données obtenues dans le cadre du programme lidar HD notamment. Pour ce jumeau, l'IGN a aussi l'ambition de s'appuyer sur les développements rapides de l'IA générative pour permettre de fabriquer des données descriptives de territoire avec l'IA et bénéficier des apports du langage naturel. *« Ce qui permettra la modélisation du comportement du territoire selon des scénarios qu'on lui soumettra,* décrypte Matthieu Porte. *De quoi offrir des prévisions d'évolution selon des choix d'aménagement différents par exemple, pour mieux aiguiller la décision publique.* » ■

Fanny Costes

* https://geoservices.ign.fr/bdforet

La Recherche consacre le dossier de son trimestriel n° 580, janvier-mars 2025 aux sols.

PRÉVENTION DES RISQUES

Vers une vision 3D de chaque parcelle

Fin 2020, l'IGN a lancé un immense chantier de modélisation 3D par lidar haute densité (HD) du territoire français. Objectif : faire que d'ici à fin 2025, les faisceaux laser apportent une vision de chaque parcelle avec une précision inédite. Séquencé sur cinq ans, le programme vise la mise à disposition de données 3D relatives au sol et au sursol, qui seront à la fois homogènes, riches, fiables, ouvertes et accessibles à tous. Le potentiel apporté par cette modélisation est considérable. Aujourd'hui, les données lidar sont déjà exploitées en matière de prévention du risque d'inondation. En octobre 2020, les avions de l'IGN ont par exemple effectué en urgence des relevés lidar dans les zones sinistrées par la tempête Alex afin de modéliser précisément les évolutions topographiques des vallées touchées par les intempéries et de faciliter la mise à jour rapide des plans de prévention des risques. Demain, les données lidar HD concernant les zones de forêt permettront d'observer la structuration des peuplements et renseigneront les chercheurs sur la porosité du couvert végétal, l'un des indicateurs clé de la santé des forêts et de leur capacité à se régénérer. *« Cela contribuera à renforcer la surveillance des forêts afin de disposer d'une carte de leur vulnérabilité au changement climatique* », souligne l'IGN.

Modéliser l'océan permettra de percer ses secrets

Les supercalculateurs de l'Ifremer offrent aux chercheurs une puissance de calcul qui, couplée à l'IA, analyse les dynamiques océaniques et contribue à la reconnaissance d'espèces marines. Même les navigateurs du Vendée Globe sont mis à contribution.

Parmi les concurrents du Vendée Globe qui ont quitté les Sables-d'Olonne, le 10 novembre dernier, plus de la moitié embarquaient des instruments de mesure océanographiques en vue de collecter des données dans les mers les plus hostiles et les moins connues de la planète. Les organisateurs prévoient d'équiper l'ensemble des bateaux participant à la prochaine édition du tour du monde en solitaire, en 2028, avec des instruments sélectionnés par l'Unesco. Cette initiative s'inscrit en effet dans le cadre de la décennie d'action pour l'océan des Nations unies. L'objectif est de mieux connaître le système océanique pour mieux le protéger. Avec le deuxième plus grand domaine maritime, qui abrite 10 % des coraux de la planète et 20 % des atolls, la France déploie quant à elle un gros effort de recherche en réalisant 120 campagnes océanographiques par an, avec une flotte de 17 bateaux scientifiques et six sous-marins.

Aujourd'hui, les données océaniques connaissent une croissance exponentielle grâce, notamment, aux satellites du programme européen d'observation de la Terre Copernicus, qui délivrent quotidiennement des quantités colossales de données concernant l'état physique et biogéochimique des océans. Ou encore aux milliers de balises déployées dans les mers du monde, qui transmettent régulièrement des informations sur la faune et divers paramètres environnementaux. S'y ajoutent les observatoires sous-marins, les drones, les stations côtières, et désormais les bateaux des marins et plaisanciers qui s'équipent d'instruments scientifiques.

Depuis 2017, ces tombereaux d'informations sont stockés et traités à Plouzané, dans le Finistère. C'est là, face à la spectaculaire rade de Brest, que l'Ifremer a installé Datarmor, un centre consacré à l'océanographie, qui mêle calcul de haute performance et intelligence artificielle. Depuis 2023, ses infrastructures sont en phase de modernisation. « *Au cours des deux dernières années, on a produit mondialement autant de données que lors de la décennie passée,* indique Guillaume de Landtsheer, directeur général pour la France de NetApp, une entreprise américaine spécialisée dans le stockage de données impliquée dans le projet. *Il est donc nécessaire de faire évoluer les solutions de stockage, de sécurisation et de gestion des données.* »

Les capacités de stockage devraient ainsi atteindre 70 pétaoctets [10^{15} octets] en 2025, contre 10 aujourd'hui, « *soit l'équivalent d'un peu plus de 70 000 iPhone de dernière génération pleins à craquer, tout en maintenant une consommation d'énergie identique* », souligne Benoît

P. HUGUEN

« Les chercheurs ont utilisé des techniques développées pour les voitures autonomes afin de faire de la reconnaissance d'espèces marines »

Benoît Morin, responsable du pôle calcul à l'Ifremer, à Plouzané (Finistère)

Yoann Richomme est le premier marin du Vendée Globe à avoir largué un flotteur Argo lors de la course, le 26 novembre. La balise mesure en temps réel la température et la salinité.

Morin, en charge du projet de renouvellement des infrastructures du centre de calcul à l'Ifremer. Sa puissance de calcul déployée en 2017 est de 426 téraflops, ce qui équivaut à celle de 2000 à 3000 ordinateurs travaillant de concert pour résoudre des équations. Le nouveau calculateur d'une puissance de 2 pétaflops pourra effectuer 2 millions de milliards d'opérations mathématiques par seconde. Surtout, le centre dispose de quatre supercalculateurs spécifiquement réservés aux applications d'IA. « *Pour obtenir cette intelligence artificielle, il faut intégrer au système un grand nombre de données afin de nuancer les résultats et contrer les biais cognitifs,* détaille Benoît Morin. *Les chercheurs ont notamment utilisé des techniques développées pour les voitures autonomes afin de faire de la reconnaissance d'espèces marines. Nous transformons en chiffres accessibles les données collectées du plancher océanique jusqu'à la surface, de la ligne de côte jusqu'à la haute mer.* »

Le système réalise des analyses à partir des données physico-chimiques de l'océan (température, salinité, degré d'acidification, concentrations en divers éléments…) qui permettent aux scientifiques de modéliser son état et de prévoir son évolution. Mais cette intelligence artificielle sert aussi à l'analyse des séquences génétiques d'espèces marines pour faire, par exemple, de la taxonomie, une discipline qui reposait jusqu'à présent sur l'observation visuelle. Un atout déployé dans le cadre du programme Meiodyssea de l'Ifremer, qui vise à décrire en trois ans jusqu'à 200 nouvelles espèces de la méiofaune, constituée de petits animaux marins nichés dans les sédiments.

iA

Un vaste projet de recensement génétique des espèces, le projet Atlasea, va quant à lui ouvrir de nouvelles voies de recherche. « *Avec le stockage et le séquençage du génome d'un grand nombre d'espèces, il va être possible de reconstituer l'arbre généalogique des espèces et remonter au moment où les branches bifurquent* », explique Benoît Morin. Cela offre aussi la possibilité d'évaluer la sensibilité d'une espèce à une maladie, de comparer les populations de poissons, ou d'étudier l'évolution d'une espèce, son adaptation au changement climatique et ses migrations. « *En Bretagne, nous observons déjà l'arrivée de populations d'algues et de méduses depuis des régions plus méridionales* », note Benoît Morin. Le système permet aussi de détecter dans les jeux de données des cas particuliers, comme des vagues scélérates — phénomène rare de vagues géantes. Connaître leur localisation et leur occurrence pourrait être utilisé, par exemple, pour la certification des navires marchands.

65 millions d'heures de calcul produites par an

L'une des applications les plus ambitieuses est la création d'un jumeau numérique de l'océan, une initiative lancée en 2022 par l'Union européenne et dont une première démonstration a été présentée en juin dernier lors du Digital Ocean Forum, à Bruxelles (Belgique). « *Il devrait permettre d'extrapoler les événements futurs, d'étudier l'influence des courants marins sur les événements extrêmes, de mieux comprendre l'évolution du Gulf Stream* », précise Benoît Morin. Le jumeau numérique devrait être opérationnel dans les prochains mois. D'ores et déjà, l'Ifremer dénombre annuellement un millier d'utilisateurs actifs de l'offre d'intelligence artificielle du centre Datarmor et environ 300 utilisateurs distincts par mois, soit probablement autant d'équipes de recherche. 65 millions d'heures de calcul sont produites par an, avec l'ambition de réaliser environ un milliard d'heures de calcul dans dix ans. ■

Sylvie Rouat

Le grand recensement du monde animal et végétal

L'automatisation du traitement des données est devenue indispensable à l'analyse de la biodiversité et de son évolution. Des modèles d'intelligence artificielle ont permis de prédire le nombre d'animaux menacés d'extinction.

L'écologue n'est pas si différent de l'enfant qui s'amuse à compter le nombre de papillons jaunes et de papillons orange, dans un champ, un après-midi d'été. *« L'écologie est une science de l'information au départ. Il faut tout identifier, tout compter, tout mesurer,* rappelle Nicolas Mouquet, chercheur CNRS et directeur scientifique du Centre de synthèse et d'analyse sur la biodiversité à Montpellier. *Quand j'étais en thèse, je me souviens avoir compté plus d'un million de brins d'herbe. Ça m'a pris des mois. Et c'était un travail tout à fait classique.* »

Aujourd'hui, une révolution est à l'œuvre en écologie, avec l'apparition de systèmes en partie autonomes, capables de collecter des données et de les classifier. Une conjonction de progrès technologique et technique rend possible ce changement de paradigme. Il y a, d'une part, les outils de mesure : ce sont les pièges photographiques, les drones, les données satellitaires, les techniques pour capter l'ADN environnemental ou encore les micros. Ils se sont démocratisés, ont été déployés un peu partout et ne cessent de gagner en précision. D'autre part, il y a les modèles d'intelligence artificielle, qui connaissent un développement sans précédent avec l'avènement de toutes les déclinaisons de l'apprentissage profond. Pour le grand public, la transformation qu'apportent ces deux types d'outils est visible au travers d'applications comme PlantNet, qui détecte les espèces végétales à partir de photos.

L'automatisation du traitement des données semble indispensable pour changer d'échelle en écologie. Car si l'étendue des connaissances est impressionnante dans cette discipline, l'étendue de l'ignorance est, elle, vertigineuse. Sur plus de deux millions d'espèces recensées (il en existerait environ cinq fois plus sur Terre), seules 166 000 ont été évaluées par l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN). Nombre d'espèces peuvent donc s'éteindre à tout

PHOTOS : BIOSPHOTO

Sur les 29 000 espèces d'orchidées existantes, seules 1850 ont jusqu'à présent été évaluées par l'UICN, qui établit la liste rouge mondiale des espèces menacées d'extinction. L'utilisation de l'IA peut accélérer le processus.

moment sans que nous nous en rendions compte. « *Ce travail prend trop de temps. On fait de la biologie de la conservation en temps de crise, il nous faut faire preuve de pragmatisme et utiliser tous les outils à notre disposition* », déclare Nicolas Mouquet. Avec son équipe, il a publié à l'automne dernier une étude pour prédire le statut de conservation de plus de 13 000 espèces de poissons marins. Deux modèles d'intelligence artificielle ont permis d'établir le statut UICN des espèces non évaluées par l'organisme ou déclarées comme ayant trop peu de données pour être évaluées. Conclusion alarmante : il y aurait au moins 12,7 % des espèces de poissons menacées d'extinction, là où l'UICN n'en a identifié que 2,7 %.

« *Notre rôle est de fournir un travail qui soit le plus robuste possible,* tempère Florian Kirchner, qui coordonne la liste rouge de l'UICN en France. *Nous passons par un processus d'expertise collégial, avec les meilleurs connaisseurs du monde sur une espèce spécifique ; il ne paraît pas envisageable de le remplacer par une intelligence artificielle.* »

Modérer la consommation de ressources

D'autant que pour l'heure, l'algorithme est loin d'être infaillible : celui testé sur la faune aquatique s'est trompé deux fois sur dix. Améliorer ces modèles est crucial car le travail à accomplir reste colossal. Par exemple, pour la seule famille des orchidées, il existe environ 29 000 espèces et l'UICN n'a statué que sur 1850 d'entre elles. En 2020, une étude dirigée par le botaniste et biogéographe allemand Alexander Zizka prédisait le statut de conservation de 14 000 espèces d'orchidées. Résultat: au moins 4300 seraient menacées d'extinction.

Mais l'utilisation de l'IA en écologie n'est pas une évidence. « *On ne veut pas utiliser des outils qui contribuent à la crise qu'on étudie. Et ça, c'est un challenge,* reconnaît Vincent Miele, ingénieur CNRS au Laboratoire d'écologie alpine. *On essaie au maximum de comprendre ces algorithmes pour être le moins gourmand possible en matière de consommation de ressources.* » Mais le constat ne satisfait pas tout le monde : « *Beaucoup d'écologues se positionnent de manière virulente contre ces méthodologies, parfois même de manière un peu dogmatique* », assure Pierre Bonnet, coresponsable de PlantNet.

Au-delà des craintes pour l'environnement, la discipline pourrait s'inquiéter de la perte de compétences humaines, car, dans certains contextes, l'intelligence artificielle fait déjà mieux que l'humain pour reconnaître des espèces sur un herbier ou une photo. La communauté se veut rassurante sur ce point. « *Il faudra toujours entraîner et évaluer les modèles. Ces outils ne fonctionneront jamais si nous perdons cette expertise apportée par la vérité du terrain* », assure Vincent Miele. Intelligence artificielle ou non, il restera donc des scientifiques qui, aux côtés des enfants, comptent les papillons jaunes et orange dans les champs. ■

Loïc Duthoit

APPLICATION

Le potentiel de la science participative décuplé

L'application PlantNet permet d'identifier des espèces végétales à partir d'une simple photo prise avec son téléphone, grâce à l'IA. La première version mobile est sortie en 2013. Dix ans plus tard, l'application a dépassé le milliard de requêtes d'identification et elle en reçoit chaque jour plusieurs centaines de milliers. *« Je n'aurais jamais cru que cet outil pouvait intéresser autant de monde »*, s'émerveille Pierre Bonnet, coresponsable de PlantNet. Et ce succès, comme dans une relation symbiotique, sert la science en retour. Grâce à toutes les photos récupérées par l'application, l'équipe de PlantNet a partagé une base de données fiable, avec plus de 12 millions d'occurrences. Près d'un millier de publications scientifiques ont déjà utilisé cette base de données.

VOISIN/PHANIE

L'intelligence artificielle progresse à grands pas dans les hôpitaux, notamment dans l'aide au diagnostic. Elle est ainsi de plus en plus utilisée dans l'analyse d'images médicales (ici au CHU de Rennes). Mais elle s'immisce également peu à peu dans la recherche.

Médecine

L'ère du diagnostic automatisé

L'IA fournit déjà une aide précieuse au médecin pour déceler une tumeur dans des images de mammographie bien avant qu'elle ne soit détectable. Autre avancée à venir : l'accélération du développement de nouveaux médicaments ou la mise au point de jumeaux numériques pour prédire les effets d'un traitement.

Par Nicolas Gutierrez C.

L'IA promet de refaçonner nos sociétés, et la santé est un des chantiers qui avance le plus vite ! Sa capacité à analyser des volumes gigantesques de données dépasse de loin celle des humains. Cet avantage est de plus en plus utilisé par les médecins, notamment pour les aider dans le diagnostic. L'arrivée des modèles de langage, tels ChatGPT et ses concurrents, n'a fait qu'accélérer cette révolution. Elle ouvre la voie à une recherche médicale dopée à l'IA, où de plus en plus de tâches seront automatisées, pour le meilleur ou pour le pire.

Un des domaines dans lequel l'IA a déjà pignon sur rue est le diagnostic du cancer du sein. En 2019, des chercheurs du Massachusetts Institute of Technology, aux États-Unis, ont présenté une IA capable de déceler une tumeur dans des images de mammographie quatre années avant qu'elle ne soit détectable par les méthodes conventionnelles. « *Je pense qu'elles vont bientôt faire mieux que les radiologues,* prédit Ethan Cerami, chercheur à l'université Harvard et à l'institut du cancer Dana-Farber, aux États-Unis. *Toutefois, ces IA ne vont pas remplacer les experts de sitôt, mais plutôt leur faire des recommandations pour les aider.* » Selon le journal spécialisé *Radiology Business*, 21 % des centres de santé aux États-Unis utiliseraient déjà l'intelligence artificielle dans l'analyse d'imagerie médicale. Désormais, l'analyse de biopsies entre aussi dans son champ d'activité. En 2023, l'institut Curie a présenté une IA issue d'une collaboration avec l'entreprise israélienne Ibex Medical Analytics, qui diminue significativement les erreurs de diagnostic et permet de vérifier rapidement le verdict du pathologiste. Cette nouvelle aide informatique est utilisée ▸

ROBOTISATON

Demain, des laboratoires sans chercheurs ?

L'IA promet d'accélérer la recherche médicale en automatisant en grande partie le processus… voire entièrement. Car elle pourrait permettre de consolider le concept de laboratoires autonomes, où des machines se chargent de toutes les étapes de l'expérimentation. Quelques exemples existent déjà, tel Adam, le robot scientifique conçu à l'université de Aberystwyth (Royaume-Uni) en 2009. Son but était d'identifier les gènes codant des enzymes de la levure. Il était capable d'émettre des hypothèses puis de les tester expérimentalement, sans la moindre intervention humaine. Plus récemment, en 2019, des chercheurs à Hongkong ont présenté dans le journal *Nature Biotechnology* un laboratoire autonome spécialisé dans la découverte de nouveaux médicaments. En 21 jours, il a imaginé les molécules qui pourraient inhiber la protéine DDR1, surexprimée dans plusieurs cancers, les a synthétisées et testées, en identifiant ainsi une susceptible de devenir un potentiel médicament. Avec les capacités accrues de l'IA, ces laboratoires autonomes deviendront sûrement plus performants… Au point de remplacer entièrement les chercheurs ? Des experts de l'université de Toronto (Canada) se sont intéressés à cette possibilité, dans une revue publiée en août 2024 dans le journal *Chemical Reviews*. Leur conclusion : malgré les avancées récentes, les laboratoires autonomes ont besoin des humains, notamment pour la résolution de problèmes… pour le moment.

▶ en routine à l'institut depuis novembre dernier pour le diagnostic du cancer de la prostate. De son côté, l'hôpital Bicêtre de l'Assistance publique-hôpitaux de Paris (AP-HP) teste une autre IA, conçue par Owkin (start-up franco-américaine) qui prédit la probabilité de rechute chez une personne traitée pour un cancer du sein. « *Plusieurs groupes analysent non seulement les cellules cancéreuses, mais aussi leurs voisines, notamment les cellules immunitaires. Cette analyse sera bientôt facilitée par l'IA, ce qui permettra plus de précision dans le traitement du cancer* », selon Ethan Cerami.

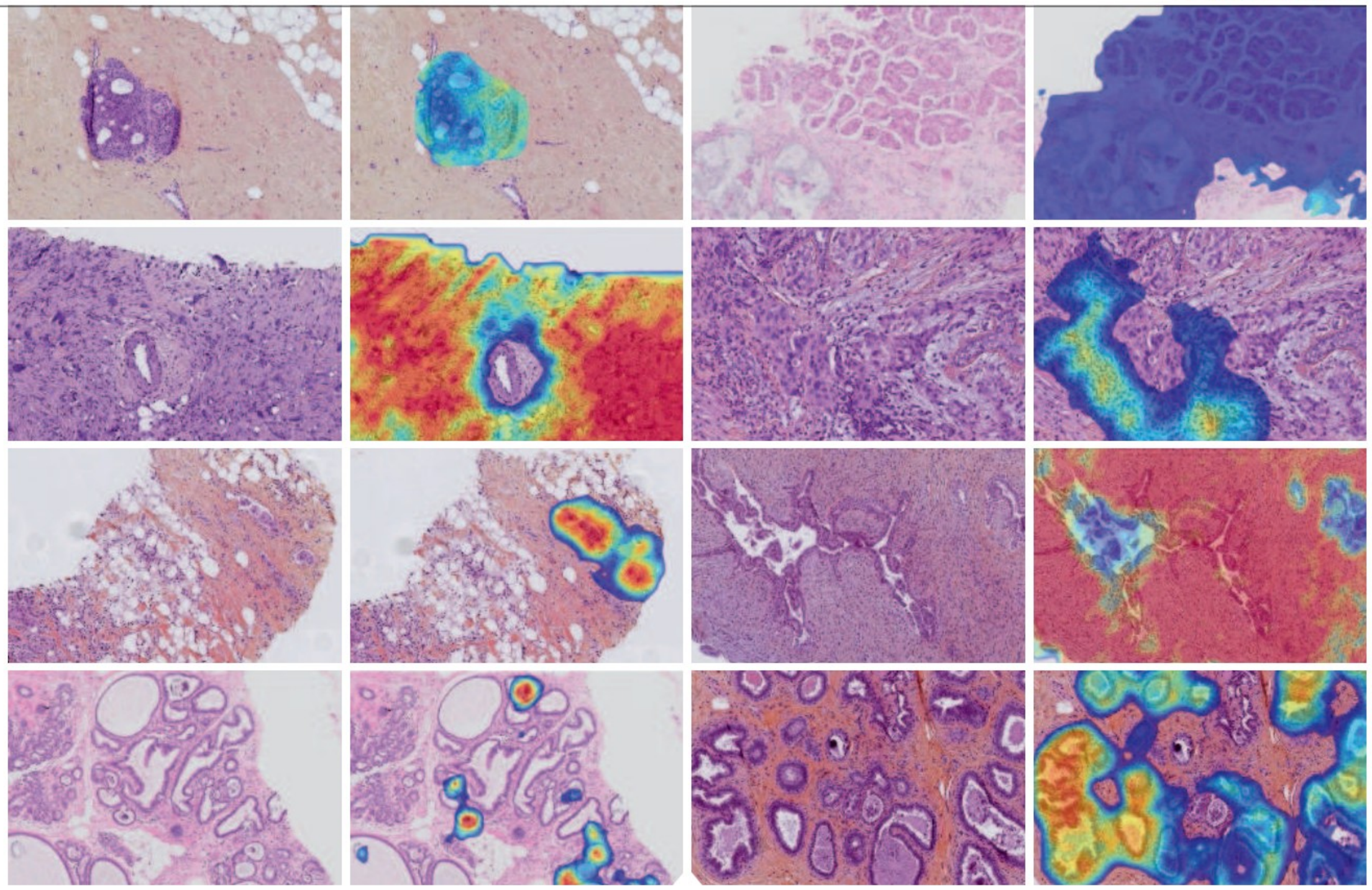
Cependant, ces IA ont besoin d'être entraînées avec énormément de données médicales pour apprendre à déceler les tumeurs. Ce qui est faisable uniquement pour les cancers les plus communs. Pour pallier ce manque, des chercheurs de l'université technique de Berlin, en Allemagne, ont fait le chemin inverse. Afin de détecter des maladies peu fréquentes du tractus gastro-intestinal, ils ont entraîné leur intelligence artificielle à reconnaître ce qui est fréquent dans les biopsies, et, ainsi, à déceler ce qui ne l'est pas. Leurs résultats, présentés en octobre dernier dans le journal *NEJM AI*, montrent que leur IA détecte correctement les cancers les plus communs, mais aussi les plus rares, et pourrait donc aider les médecins à les repérer.

Mais ces IA restent très spécialisées pour des maladies ou des tissus particuliers. L'émergence d'IA plus versatiles, telles que ChatGPT et les autres modèles de langage, a marqué un tournant dans le diagnostic médical. Car non seulement elles apprennent toutes seules, mais elles peuvent adapter leurs nouvelles connaissances d'un domaine à un autre. Des chercheurs de l'université Harvard ont ainsi présenté en septembre dernier, dans le journal *Nature*, une IA capable de détecter des tumeurs dans presque tous les tissus du corps humain. D'autres sont encore plus puissantes, telle BiomedGPT qui peut analyser des images médicales mais aussi du texte, et pourrait être utilisée dans tous les domaines de la médecine (*lire l'encadré p. 70*). Grâce à cette capacité à « comprendre » images et texte pour ensuite en générer, les IA ne se contentent plus d'analyser des données médicales. Désormais, elles peuvent aider à toutes les étapes.

Les IA prennent en charge la prise de notes des médecins (comme l'assistant de consultation proposé par Doctolib) et les épaulent dans le diagnostic à partir des symptômes et de l'historique médical du patient. Selon une étude publiée en septembre 2024 dans le journal *BMJ Health & Care Informatics*, un médecin britannique sur cinq utilise régulièrement ChatGPT ou une autre IA générative lors des consultations, notamment pour l'aide au diagnostic.

L'IA prend désormais part à la conception de médicaments

Mais c'est surtout la recherche qui bénéficie du coup d'accélérateur donné par l'IA. Cette dernière peut en effet participer à des étapes clés, proposant des hypothèses scientifiques ainsi que le protocole expérimental le plus adapté pour les tester. Plusieurs entreprises pharmaceutiques ont déjà intégré l'IA pour accélérer et optimiser ces processus. C'est notamment le cas de Sanofi, qui l'utilise pour l'analyse de données, mais aussi pour proposer aux chercheurs des hypothèses. Selon l'entreprise, cette approche a accéléré significativement le processus de recherche de nou-



JUDITH SANDBANK ET AL.

Le logiciel Galen Breast, fruit d'un partenariat entre l'institut Curie (Paris) et une start-up israélienne, a été entraîné pour analyser des caractéristiques morphologiques des tissus du sein et identifier ainsi les tumeurs mammaires.

veaux médicaments. Ce qui prenait des semaines est effectué désormais en quelques heures, et le taux de succès pour trouver de nouvelles cibles thérapeutiques aurait grimpé de 20 à 30 %. Cette aide à trouver des cibles thérapeutiques est renforcée par la capacité d'autres IA, telle AlphaFold *(voir p. 75)*, capables de prédire la structure de n'importe quelle protéine, avec une précision presque aussi bonne que les meilleures techniques de cristallographie (étude de la structure à l'échelle atomique). Ainsi, les chercheurs peuvent « créer » virtuellement, puis « tester » virtuellement un grand nombre de molécules possibles afin d'identifier celles qui auraient le plus de chances de réussir à réguler la protéine cible. « *AlphaFold est très utile comme point de départ,* affirme Tom Terwilliger, expert en cristallographie au Laboratoire national de Los Alamos aux États-Unis. *Mais ses hypothèses doivent ensuite être confirmées expérimentalement en laboratoire.* »

Cependant, plusieurs entreprises pharmaceutiques utilisent déjà l'IA pour concevoir de nouveaux médicaments. Insilico Medicine (États-Unis et Hongkong), par exemple, a conçu un médicament contre la fibrose pulmonaire idiopathique, maladie chronique qui affecte les poumons. Son IA a trouvé la cible thérapeutique, puis imaginé la molécule médicamenteuse. Selon l'entreprise, le processus de découverte de la cible et du médicament a été réalisé en à peine dix-huit mois ; il est désormais testé en essai clinique de phase 2. Si les résultats sont positifs lors des phases 2 et 3, ce médicament pourrait arriver sur le marché beaucoup plus rapidement qu'un traitement conçu traditionnellement — processus qui peut prendre plus de dix ans. L'étape la plus lente serait les essais cliniques, lesquels ne peuvent pas être pris en charge par les IA… pour le moment. Mais cela pourrait changer rapidement, grâce à l'émergence des jumeaux numériques, des représentations virtuelles de patients qui permettent de prédire les effets d'un traitement, par exemple. « *C'est une technologie qui nous aidera à avancer dans le concept de médecine person-*

UNIVERSITY OF FLORIDA

« Il y a un risque que l'on utilise ces technologies non parce qu'elles sont meilleures, mais parce qu'elles sont moins chères »

Reinhard Laubenbacher, directeur du Laboratoire de médecine computationnelle à l'université de Floride (États-Unis)

nalisée, afin d'adapter les traitements à chaque patient », résume Reinhard Laubenbacher, qui dirige le Laboratoire de médecine computationnelle à l'université de Floride (États-Unis).

Cette idée de jumeaux numériques a d'abord été appliquée à d'autres domaines. Par exemple, Singapour a déjà créé son jumeau numérique, une réplique détaillée de toute l'infrastructure et de la population de la cité-État. Cette approche permet de modéliser les flux de la circulation, entre autres, et ainsi prédire, par exemple, quelles seraient les conséquences de la fermeture d'une rue, de façon bien plus précise qu'en utilisant un modèle de ville standard. Ce principe commence à faire ses premiers pas en santé.

Simuler l'organe malade pour trouver le bon traitement

Le meilleur exemple est celui du pancréas artificiel pour le traitement du diabète de type 1, qui génère un jumeau numérique du métabolisme du glucose du patient. L'implant mesure en continu le niveau de glucose dans le sang, afin de prédire quel sera le niveau quelques minutes plus tard, et ainsi estimer si la personne a besoin d'une injection d'insuline, calculer la dose nécessaire et pratiquer l'injection. « *C'est un modèle mathématique qui simule le métabolisme du glucose humain et qui est affiné avec les données épidémiologiques et physiologiques du patient,* explique Reinhard Laubenbacher. *Avec cette approche, il y a une communication constante entre la personne et son jumeau : les données réelles permettent de recalibrer constamment le modèle pour que sa simulation soit au plus près de la personne, et le jumeau numérique peut ainsi déterminer le traitement dont elle a besoin et le lui appliquer.* »

Idéalement, nous pourrions tous un jour posséder un jumeau numérique qui simule tout notre corps. Un avatar virtuel calibré avec nos données génétiques et physiologiques pour permettre aux médecins de savoir ce qui ne va pas, et trouver un remède. « *Mais cela serait trop compliqué : la complexité du seul cœur humain dépasse de loin celle de toute la ville de Singapour, alors imaginez pour le corps entier !* », tempère Reinhard Laubenbacher. En revanche, les jumeaux numériques pourraient voir le jour rapidement pour des essais cliniques. Dans ce cas, il suffirait de simuler l'organe malade, afin d'estimer quel traitement serait le plus efficace. « *On pourrait imaginer que chaque participant a son jumeau numérique, les patients sont dans le groupe contrôle alors que les copies virtuelles sont dans le groupe avec traitement,* explique-t-il. *Ceci permettrait de prédire quel traitement et quel dosage seraient les plus adaptés pour chaque patient, avant de le tester.* » Ce qui potentiellement pourrait diminuer le risque d'effets secondaires et réduire les temps et les coûts de l'essai clinique.

Combinés aux autres applications de l'IA en médecine, ces jumeaux numériques permettraient d'automatiser presque toutes les étapes de la recherche médicale, de l'identification de la cible thérapeutique et la conception du médicament à l'analyse de ses potentiels effets, positifs ou négatifs, sur un patient spécifique. « *Mais il y a un risque : que l'on utilise ces technologies dopées par l'IA non pas parce qu'elles sont meilleures, mais parce qu'elles sont moins chères* », prévient Reinhard Laubenbacher. « *Nous devons évaluer rigoureusement leur utilité : le but est-il d'améliorer la santé des patients, ou de réduire les coûts ?* », abonde Ethan Cerami. Ce qui est sûr, c'est que l'application de l'IA en santé ne fait que commencer. ■

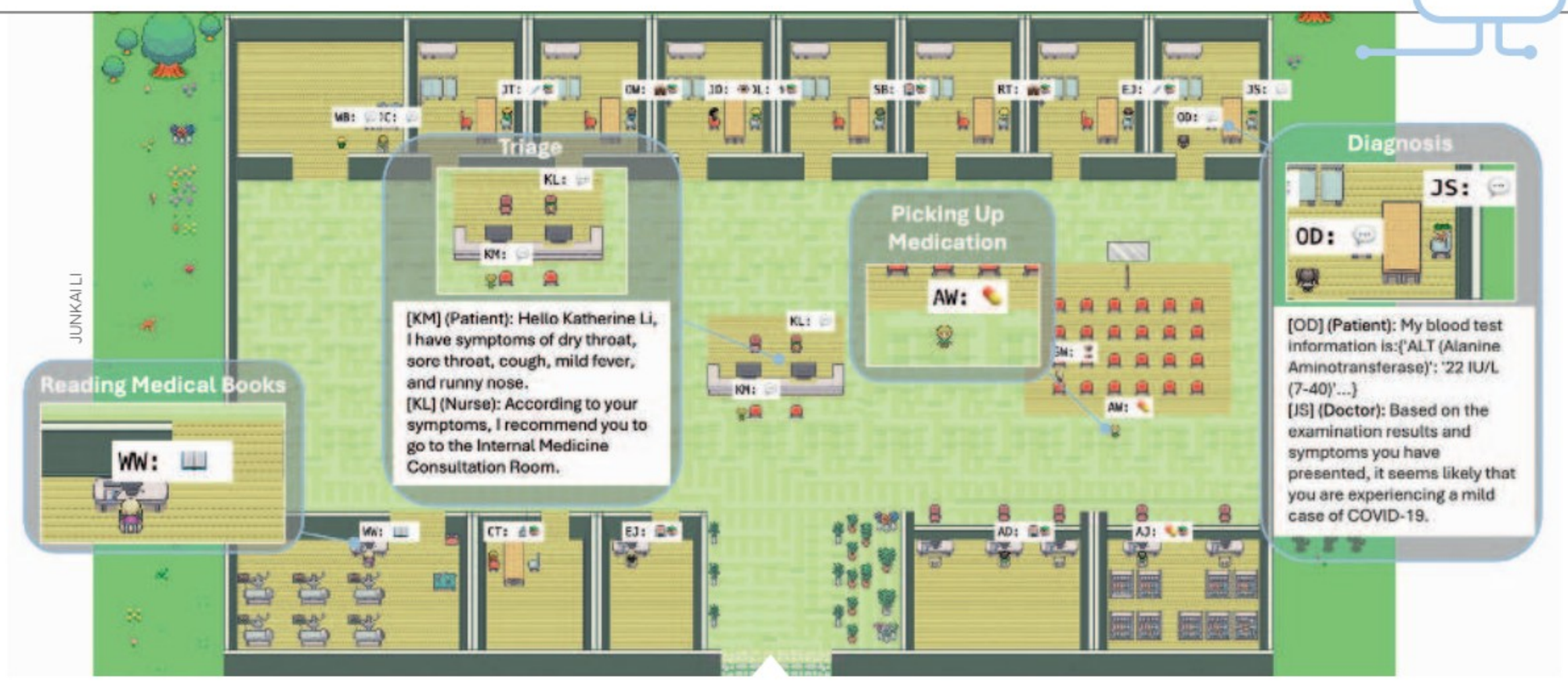
INHEART

Ce cœur numérique en 3D permet de seconder les interventions sur les arythmies cardiaques.

DIAGNOSTIC

Un ChatGPT pour les médecins

La capacité des IA génératives à trouver le bon diagnostic à partir des symptômes du patient est encore loin d'être parfaite. Selon une étude publiée en juillet 2024, ChatGPT trouve le bon diagnostic seulement une fois sur deux. Mais cela pourrait changer rapidement, grâce à l'émergence des IA plus spécialisées en médecine, telles que BiomedGPT, conçue par des chercheurs de l'université Lehigh et de l'hôpital général du Massachusetts, aux États-Unis, et présentée en août 2024 dans *Nature Medicine*. Leur modèle est entraîné uniquement avec des données de santé de l'hôpital ; il est donc beaucoup moins lourd que ChatGPT et les autres grands modèles de langage qui ont ingurgité tout Internet et nécessitent des milliards de paramètres. BiomedGPT en utilise beaucoup moins, mais atteint des résultats plus précis. De plus, sa petite taille n'exige pas de gros serveur, mais une simple installation dans l'ordinateur du médecin ou l'équipement médical, sans connexion à Internet. Ce qui facilitera sans doute la popularisation de cette assistance informatique chez les soignants.



Les modèles d'apprentissage d'Agent Hospital permettent de simuler l'ensemble du processus de prise en charge d'un patient.

En Chine, une ville-hôpital virtuelle

Une université pékinoise a conçu un environnement 100 % simulé où des patients virtuels seront pris en charge par une IA médicalisée. Le but est de former les futurs professionnels de santé.

C'est un hôpital où le traitement de plusieurs milliers de patients virtuels par jour sera bientôt possible. Tout se passe(ra) en Chine, à l'université Tsinghua (Pékin), qui a prévu de lancer une ville-hôpital reposant entièrement sur l'intelligence artificielle. Inspirée de Smallville — ce monde virtuel développé par l'université Stanford (États-Unis) depuis 2023, qui met en scène des agents d'IA interagissant selon des comportements humains — l'expérience chinoise aura quant à elle pour nom de code « Agent Hospital ». Ici, ni murs ni salles de soins, pas plus de blouses blanches de médecins ou d'infirmières. Et d'ailleurs, pas non plus de patients. Comme le précise l'université, tout se passera dans un environnement 100 % simulé où des patients virtuels seront pris en charge par une IA médicalisée. Le système devrait être opérationnel d'ici au début de cette année 2025.

Un objectif de 3000 patients traités chaque jour

L'objectif affiché de l'équipe de chercheurs, informaticiens et ingénieurs coordonnée par Liu Yang, membre de l'institut pour la recherche industrielle en intelligence artificielle de l'université, est pour le moins ambitieux: former dans ce monde virtuel les futurs (et bien réels) professionnels de santé de demain. Selon un article du *Global Times*, journal chinois en langue anglaise, les programmes développés par les chercheurs donneront ainsi bientôt naissance à 18 agents d'IA, dont 14 médecins chargés de diagnostiquer les maladies et proposer des traitements, assistés de quatre autres agents infirmiers, destinés pour leur part aux tâches de soutien quotidiennes — la hiérarchie n'ayant pas disparu dans le monde virtuel. Objectif chiffré de cette équipe de choc : traiter 3000 patients par jour, soit 10 000 en quelques jours, une tâche qui prendrait au moins deux ans à effectif humain égal. Avec Agent Hospital, chaque membre deviendra capable, grâce aux modèles d'apprentissage de type LLM (grands modèles de langage), de simuler l'ensemble du processus de prise en charge médicale, de l'examen initial permettant de poser le diagnostic jusqu'à la prescription du traitement, son évaluation et son suivi.

Selon le *Global Times*, ces fameux agents un peu particuliers auraient déjà atteint un taux de précision impressionnant de 93,06 % sur un ensemble de données équivalentes à des questions d'examen de licence médicale américaine couvrant les principales maladies respiratoires. Un domaine d'expertise sans doute inspiré par la dernière pandémie de Covid-19. L'équipe de l'université a ainsi déclaré à la presse chinoise que son système d'IA pourrait à terme simuler et prévoir diverses situations comme l'émergence, la propagation et le confinement de maladies infectieuses, dues à des bactéries ou des virus, eux, bien réels. ■

Sylvie Riou-Milliot

Réparer l'humain avec des implants cérébraux

Les avancées récentes en intelligence artificielle permettent de décoder de manière de plus en plus précise la parole des personnes en situation de handicap équipées d'implants neuronaux. Ces nouvelles interfaces prennent en compte l'intention de l'utilisateur et s'adaptent même au contexte.

De l'IA plein la tête. C'est le rêve fou du milliardaire Elon Musk, qui compte sur son implant intelligent Neuralink pour survivre face à la menace de ces mêmes IA… Rassurez-vous, nous n'y sommes pas du tout. Les intelligences artificielles omnipuissantes à la Skynet dans *Terminator* n'ont pas encore vu le jour. Et nous ne comprenons pas suffisamment bien le cerveau humain pour prétendre fusionner notre esprit avec un ordinateur. Toutefois, il y a bien de plus en plus d'implants cérébraux qui intègrent l'intelligence artificielle, mais dans un but très différent : réparer le corps humain. Ces interfaces cerveau-machine décodent l'activité d'une région spécifique du cerveau et utilisent cette information pour contrôler une machine telle qu'une prothèse, un fauteuil roulant ou un exosquelette. Elles permettent ainsi à une personne en situation de handicap de gagner en mobilité et en autonomie. Les avancées récentes en matière d'intelligence artificielle, notamment l'émergence de modèles de langage tels que ChatGPT, ont significativement amélioré les capacités de décodage de ces implants. C'est notamment le cas dans une de ses utilisations les plus complexes, le décodage de la parole, où il est nécessaire de comprendre l'intention de l'utilisateur, mais aussi les règles du langage dans lequel il s'exprime. « *Avec un algorithme traditionnel, qui se contente de lire l'activité cérébrale et de la traduire, la précision est beaucoup plus faible ; l'IA permet de l'améliorer substantiellement* », résume Alexander Silva, bio-ingénieur à l'université de Californie à San Francisco (États-Unis), qui a conçu un des implants les plus performants à ce jour.

Grâce à ses 128 électrodes, celui-ci capte l'activité du cortex de la région qui gère la parole. Puis, cette activité est décodée par une intelligence artificielle générative qui prédit le mot que l'utilisateur veut prononcer ainsi que la suite de la phrase (de la même

ALEXANDER SILVA

« L'utilisation d'un modèle de langage permet au dispositif de prédire dans quelle langue le patient essaie de parler »

Alexander Silva, bio-ingénieur à l'université de Californie à San Francisco (États-Unis)

NOAH BERGER/SWNS

L'interface cerveau-machine des chercheurs de l'université de Californie à San Francisco (États-Unis) traduit les signaux électriques émis dans les zones cérébrales de la patiente à une vitesse moyenne de 78 mots par minute, puis lus par un avatar.

façon que ChatGPT prédit quel mot doit suivre ceux déjà écrits). Mais il ne s'arrête pas là. « *L'utilisation d'un modèle de langage permet au dispositif de prédire quelle est la phrase la plus probable à partir de l'activité cérébrale du patient, mais aussi dans quelle langue il essaie de parler* », révèle-t-il. Car cet implant est bilingue et peut comprendre l'anglais et l'espagnol.

La parole décryptée avec une précision allant jusqu'à 97,5 %

Il a été testé chez un Américain de 36 ans ayant perdu la capacité de parler à la suite d'un accident vasculaire cérébral (AVC) qui a paralysé les muscles liés à la parole. Or il est d'origine latino-américaine et parle en espagnol avec sa famille, mais en anglais au travail (il est défenseur des droits des patients). Les deux langues sont donc très importantes dans sa vie. Pour s'accommoder à cette réalité, l'IA de l'implant comporte deux modules. L'un sélectionne le mot en anglais le plus probable en fonction de l'activité cérébrale du patient, puis la phrase la plus probable à la suite de ce mot. L'autre module fait la même chose en espagnol, et ensuite la phrase — et donc la langue — avec la plus haute probabilité est sélectionnée. Atteignant ainsi une précision de 88 % pour la détection de la langue et de 75 % pour la phrase en entier, selon des résultats publiés en mai 2024 dans *Nature Biomedical Engineering*.

En 2023, cette même équipe avait déjà présenté dans le journal *Nature* un implant piloté par l'intelligence artificielle qui permettait de décoder la parole à un débit de 78 mots par minute, loin encore de la vitesse d'élocution normale (de 150 mots par minute), mais bien mieux que les implants précédents, avec une précision de 75 %. Et en août 2024, une équipe de l'université de Californie à Davis (États-Unis) a présenté dans le *New England Journal of Medicine* un implant avec une précision de 97,5 % (mais un débit moindre, de 30 mots par minute). « *Ne pas pouvoir communiquer est tellement frustrant et démoralisant. C'est comme être piégé,* expliquait à l'époque l'utilisateur de cet implant, Casey Harrell, atteint de la maladie de Charcot. *Une technologie comme celle-ci aidera les personnes à réintégrer leur vie et la société.* »

La précision et le débit de ces implants cérébraux vont sûrement continuer à croître, car ils auront de plus en plus de données sur lesquelles s'appuyer pour perfectionner leurs prédictions. Car la prochaine étape sera de débarrasser ces implants de leurs fils (c'est déjà le cas pour l'implant de Neuralink ou encore celui conçu par Clinatec, à Grenoble, qui pilote un exosquelette). *« Cela va permettre aux patients de les utiliser en l'absence des chercheurs, et l'implant pourra ainsi collecter des données presque en continu, ce qui permettra d'améliorer l'entraînement des IA,* avance Alexander Silva. *Mais il faut s'assurer que ces données seront traitées d'une façon qui respecte la confidentialité des données du patient ; c'est une discussion qu'on devra aborder rapidement.* »

Cette utilisation en continu de l'implant poserait aussi un autre problème : s'assurer qu'il générera de la parole uniquement lorsque l'utilisateur veut vraiment parler ! Car la région du cortex analysée par ces dispositifs de décodage de la parole s'active aussi lorsque la personne écoute quelqu'un parler, quand elle lit un livre, et même quand elle réfléchit. Une activation inopinée de l'implant pourrait donc faire que l'utilisateur pense à voix haute malgré lui.

Éviter au modèle de langage les « hallucinations »

Un autre risque est la tendance des modèles de langage à « halluciner », c'est-à-dire à raconter n'importe quoi. L'IA de ces dispositifs fonctionne à deux niveaux : le premier décode l'activité cérébrale, et le second utilise les statistiques liées à la structure du langage pour faire ses prédictions à partir de l'activité décodée. Moins ce décodage est fiable, plus le système devra s'appuyer sur les prédictions liées au langage, augmentant la probabilité des hallucinations. Il sera donc essentiel d'augmenter la précision du décodage, par exemple en utilisant davantage d'électrodes pour avoir une image plus exacte de l'activité et donc du mot que la personne veut prononcer. *« Optimiser ce décodage réduira le poids donné au modèle de langage et pourra éviter les hallucinations »*, espère le bio-ingénieur.

Désormais, les chercheurs réfléchissent à rendre la parole décodée la plus naturelle possible, notamment en décryptant les mots, mais aussi les sons, afin de capter l'intonation, et donc les émotions. Puisqu'elle est couplée à des synthétiseurs de voix imitant celle de l'utilisateur, on pourra ainsi entendre si la phrase *« c'est génial d'avoir de l'IA dans la tête »* est dite avec enthousiasme… ou avec sarcasme. ■

Nicolas Gutierrez C.

UMC UTRECHT

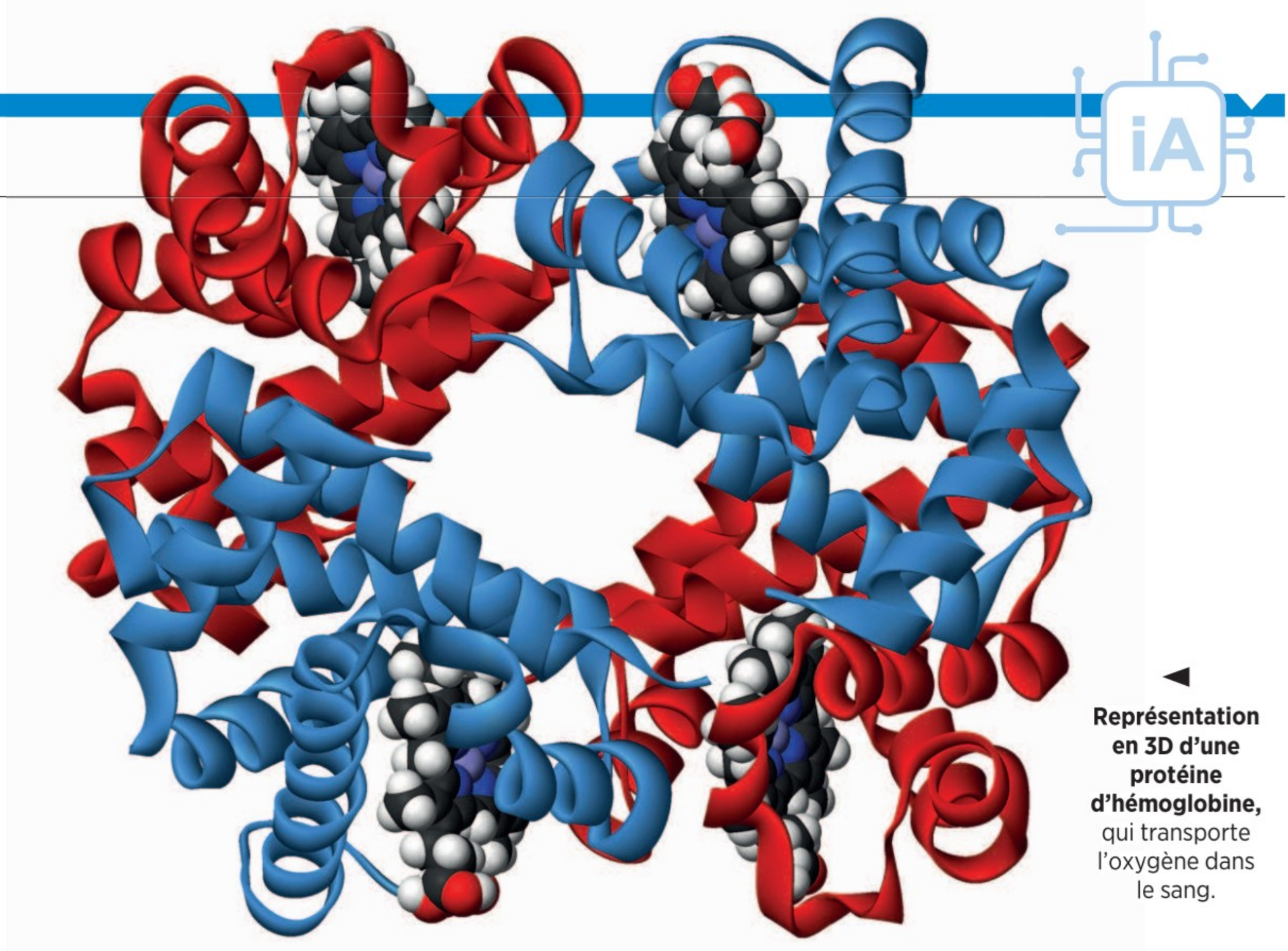
VERBATIM

ODILE VAN STUIJVENBERG

EXPERTE EN ÉTHIQUE DES NEUROPROTHÈSES PILOTÉES PAR L'IA AU CENTRE MÉDICAL UNIVERSITAIRE D'UTRECHT (PAYS-BAS)

« Il faut s'assurer que l'utilisateur garde le contrôle »

“Du point de vue éthique, la préoccupation principale est que l'IA fasse des erreurs de prédiction, et donc que la parole générée soit différente de l'intention de l'utilisateur. D'abord, parce que cela peut entraver sa libre expression. Mais aussi parce que la population de patients qui utilisera ces implants pour décoder la parole peut être confrontée à des questions sensibles, comme la fin de vie et la continuation ou l'arrêt de soins. On peut donc imaginer les implications graves que des erreurs d'interprétation pourraient avoir. Pour éviter cela, il faut s'assurer que l'utilisateur garde le contrôle. Par exemple avec des mécanismes de veto, où la personne peut stopper à tout moment le système si elle juge que le décodage de la parole n'est pas en accord avec ce qu'elle veut dire. Une autre possibilité serait de permettre à l'utilisateur d'écouter en amont la parole générée par l'implant, afin de la valider avant que les autres puissent l'entendre. Mais il faut prendre en compte que ces options peuvent ralentir la fluidité de la communication. Il sera donc important d'intégrer une approche qui puisse s'adapter au contexte et à la personne. Certains utilisateurs voudront plus de précision que d'autres. Et il y a des contextes où il est moins grave de faire quelques erreurs, par exemple en parlant avec sa famille ou ses amis, auquel cas on pourrait sacrifier un peu de précision au profit d'un meilleur débit de parole. En revanche, dans un contexte où il faut prendre des décisions, il serait peut-être plus pertinent de diminuer la vitesse de communication afin de privilégier la précision. Le système doit pouvoir s'adapter aux préférences de l'individu. Il sera donc essentiel d'inclure les utilisateurs potentiels dans le processus de développement de ces neuroprothèses pour comprendre leurs préférences. En définitive, ce qui compte c'est l'utilisateur et ses besoins.”



Représentation en 3D d'une protéine d'hémoglobine, qui transporte l'oxygène dans le sang.

La structure des protéines résolue

L'algorithme AlphaFold a déterminé, en seulement un an, la structure des 200 millions de protéines connues. Sa nouvelle version permet de prédire les interactions entre les protéines et de grosses molécules comme l'ADN ou l'ARN.

S'il y a bien un domaine où l'intelligence artificielle a permis à la science de faire un bond de géant, c'est sans conteste celui de la résolution de la structure des protéines. Quelques chiffres pour se rendre compte de l'ampleur de la tâche. En juillet 2021, la banque de données mondiale des protéines (Protein Data Bank, PDB) contenait les structures d'environ 200 000 protéines. Cela avait pris près d'un demi-siècle de travail acharné et nécessité les efforts collectifs de centaines d'équipes de recherche en biologie à travers le monde. Les méthodes, longues et fastidieuses, s'appuyaient sur la cristallographie et la microscopie électronique. Seulement, on était très loin du compte, une goutte d'eau dans le vaste océan protéique, puisque le monde du vivant dans son intégralité compte mille fois plus de ces molécules, soit 200 millions. Autant dire qu'à ce rythme-là, plus de 150 siècles auraient été nécessaires pour disposer du catalogue complet!

Seulement, cette même année 2021, l'outil d'IA AlphaFold développé par Google Deepmind s'attelle à cette tâche titanesque et apparemment insurmontable. Et, déflagration parmi les spécialistes du domaine, il ne lui faut qu'une toute petite année pour déterminer, à lui tout seul, la structure des 200 millions de protéines restantes!

« Durant mes études de biochimie, une année entière m'avait été nécessaire pour collecter les données concernant la protéine Rubisco, une enzyme clé de la photosynthèse. Aujourd'hui, ça me prend, littéralement, cinq secondes! », se souvient Christian Cambillau, directeur de recherche CNRS au Laboratoire d'ingénierie des systèmes macromoléculaires de Marseille. Le chercheur était à l'orée de la retraite lorsque AlphaFold a débarqué dans le monde de la recherche à l'été 2021. Devant les potentialités incroyables offertes par l'outil d'IA, il n'a pu s'empêcher de rempiler… *« J'ai sauté sur l'occasion et j'ai continué de travailler. Depuis cette date, j'ai*

BENJAH-BMM27

publié une quinzaine d'articles scientifiques sur lui ! » De l'avis de tous les biologistes, il y a un avant et un après AlphaFold. Le sujet, pour complexe qu'il soit, est le véritable graal de la biochimie, la promesse de comprendre comment les molécules du vivant interagissent, et ainsi permettre la mise au point de bien meilleurs médicaments et outils thérapeutiques.

ANTOINE TALY

« AlphaFold permet d'accélérer le processus de développement d'un médicament en raccourcissant la partie préclinique »

Antoine Taly, chercheur CNRS au Laboratoire de biochimie théorique, à Paris

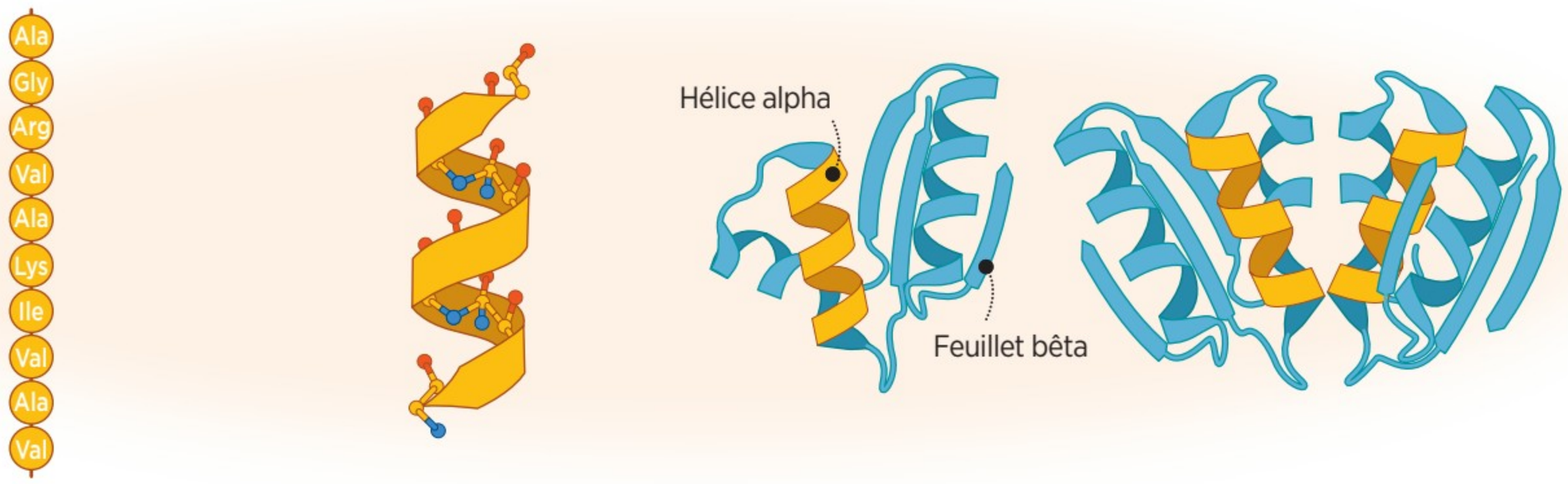
Une révolution protéique couronnée par le Nobel 2024

Si la question de la structure des protéines recèle tant d'importance, c'est que ces molécules n'acquièrent une fonction que par la forme tridimensionnelle prise par les chapelets d'acides aminés qui les composent (*voir l'infographie*). Un peu comme la différence séparant un marteau d'un tournevis. Les deux outils peuvent avoir le même nombre d'atomes de fer de base, mais c'est l'arrangement de ces derniers qui fait la spécificité de ces outils et leur confère une forme et une fonction précise.

Pour les protéines, c'est la même chose. Seulement, s'il est aisé de connaître leur composition primaire, tout se complique lorsqu'il s'agit de déterminer la forme 3D que ces molécules adopteront. Le biologiste moléculaire américain Cyrus Levinthal (1922-1990) calcula qu'une petite protéine composée d'une centaine d'acides aminés pouvait prendre au minimum 10^{47} formes différentes, soit 100 milliards de milliards de milliards de milliards de milliards… Et certaines protéines totalisent des milliers voire des dizaines de milliers d'acides aminés ! C'est pour cette raison que l'algorithme d'intelligence artificielle AlphaFold a été accueilli comme le messie par la communauté scientifique. Signe supplémentaire de son importance, et fait suffisamment rare pour être souligné, seulement quatre ans séparent sa conception de la reconnaissance par un prix Nobel attribué en octobre dernier à ses créateurs Demis Hassabis, John Jumper de l'entreprise Google Deepmind et David Baker (*lire l'encadré ci-contre*) de l'université de Washington (États-Unis). Et la révolution protéique ne va pas s'arrêter en si bon chemin. AlphaFold en est à sa troisième version, qui vient d'être rendue disponible pour les laboratoires du monde entier. « *Celle-ci peut*

ORGANISATION STRUCTURALE

Les quatre étapes de la construction d'une protéine



STRUCTURE PRIMAIRE
Quand elle est fabriquée par l'organisme, une protéine n'est au départ qu'un filament constitué d'un chapelet d'acides aminés (ici, Ala est l'alanine, Gly la glycine, Arg l'arginine, Val la valine, etc.). C'est la structure primaire.

STRUCTURE SECONDAIRE
Par la suite, en fonction de cette séquence et des affinités entre acides aminés, le chapelet se réarrange en une structure secondaire.

STRUCTURE TERTIAIRE
Dans sa conformation tertiaire, le chapelet se complexifie encore un peu dans l'espace en formant des motifs géométriques simples, l'hélice alpha et le feuillet bêta. Et c'est précisément cette forme qu'AlphaFold parvient à prédire.

STRUCTURE QUATERNAIRE
Enfin, plusieurs protéines peuvent s'agencer pour former des structures quaternaires encore plus complexes, constituées de dizaines de milliers d'acides aminés.

BRUNO BOURGEOIS

être utilisée pour prédire non seulement la structure d'une seule protéine, mais aussi celle d'un complexe protéique, explique Marcin Suskiewicz (CNRS, université d'Orléans). *Vous pouvez donc essayer de prédire un complexe entre la protéine qui vous intéresse et des centaines ou des milliers d'autres protéines. AlphaFold peut donc être désormais utilisé comme une méthode de criblage informatique à haut débit pour les interactions protéine-protéine. C'est ainsi que l'on a récemment découvert les protéines qui permettent à l'ovule et au spermatozoïde de se rencontrer.* »

Et Christian Cambillau de préciser : « *Cette nouvelle version n'a plus rien à voir avec la précédente qui était déjà très bien. Ses concepteurs ont totalement réécrit le programme et il est significativement plus puissant. AlphaFold 2 ne prédisait pas tout. 20 % des protéines sont intrinsèquement désordonnées et il avait du mal à les modéliser. AlphaFold 3 a résolu ces problèmes, avec de surcroît un gain de vitesse d'un facteur 20.* »

Même constat pour Yves-Henri Sanejouand (CNRS, université de Nantes) qui prédit que « *la puissance d'AlphaFold 3 sera sans nul doute utilisée dans le concept de nouveaux médicaments et pour sélectionner des molécules d'intérêt. Seulement, c'est encore un peu tôt. Un médicament nécessite quinze ans de mise au point. AlphaFold n'existe que depuis six ans…* »

AlphaFold 3 peut prédire des interactions entre molécules

Pour l'instant, les industries pharmaceutiques gardent leurs travaux secrets mais tous les chercheurs académiques en sont persuadés : AlphaFold s'apprête à révolutionner le secteur. « *Des sommes colossales sont en jeu pour l'industrie pharmaceutique,* dit Antoine Taly, chercheur CNRS au Laboratoire de biochimie théorique (LBT), à Paris. *En outre, le programme permet d'accélérer le processus de développement d'un médicament en raccourcissant la partie préclinique. Ce qui améliore grandement la gestion des risques.* » AlphaFold 3 permet aujourd'hui de prédire les interactions entre les protéines et des grosses molécules comme l'ADN ou l'ARN. Les biochimistes rêvent à de futures versions qui pourraient par exemple « *modéliser des interactions entre bactéries ou entre cellules,* imagine Christian Cambillau. *D'ores et déjà, on peut étudier celles entre des petits virus. Mais d'ici à quelques années, je suis persuadé que l'on pourra visualiser des interactions entre micro-organismes.* »

Pour le moment, cet outil extrêmement puissant a encore des limitations. « *Notamment concernant des molécules très flexibles,* expose Marc Baaden directeur de recherche CNRS au LBT. *C'est le cas pour certaines protéines ou l'ARN. Il existe par exemple des moteurs moléculaires vraiment dynamiques qui se comportent comme des micromoteurs avec des roulements, des pièces qui tournent. Ces protéines ont des structures quaternaires et sont un assemblage de plusieurs protéines que AlphaFold échoue pour l'instant à modéliser.* »

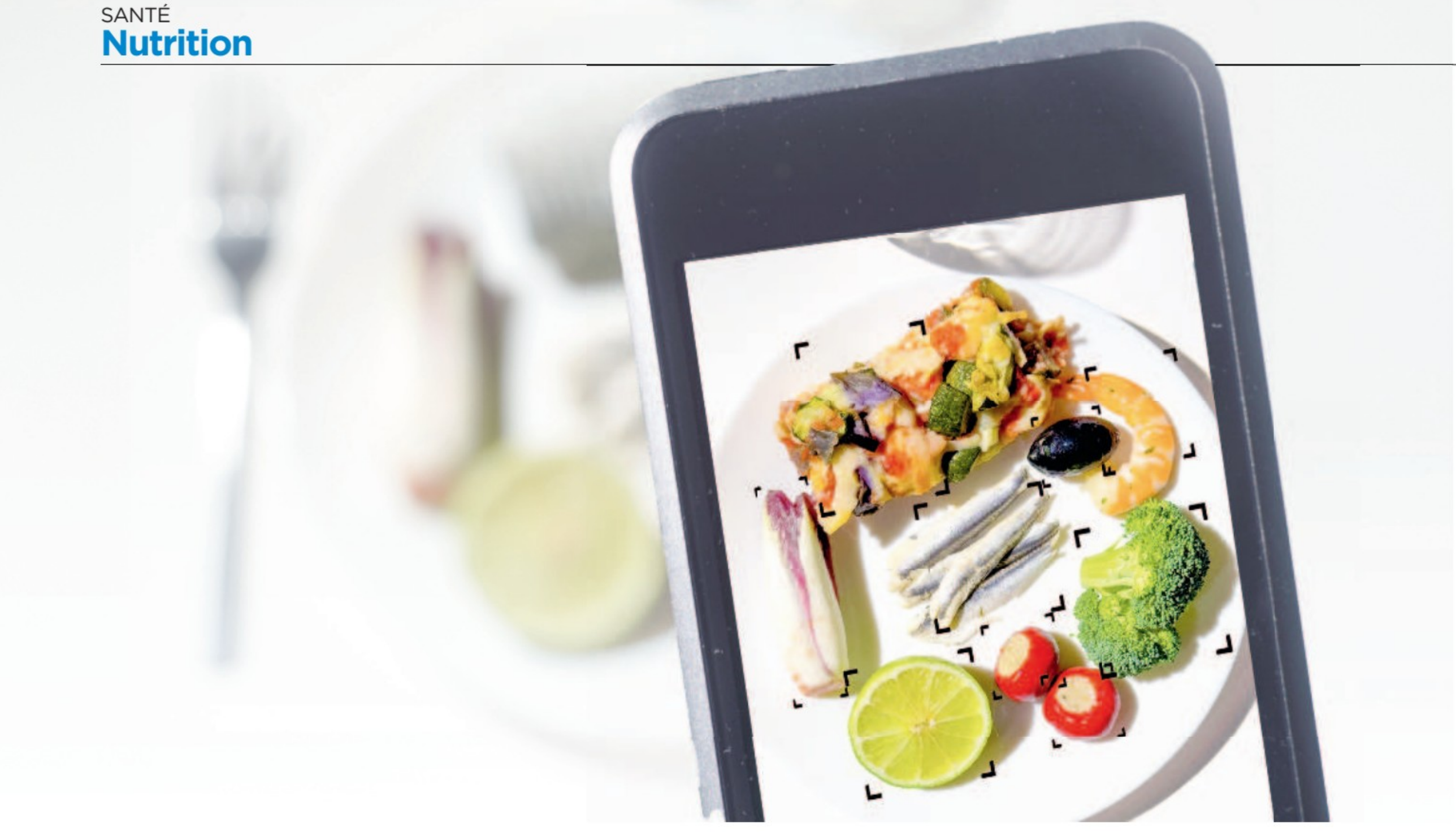
Et après les protéines, l'IA devra s'attaquer à des molécules plus complexes encore. « *Les protéines ont 20 briques de base,* poursuit Marc Baaden. *Les sucres, il en existe 160 différents, qui plus est avec des ramifications… Et sans oublier les lipides, essentiels dans la structure des membranes et dont il existe 10 000 versions. Or, c'est un champ de recherche tout récent, la lipidomique est indispensable pour comprendre comment un virus pénètre dans une cellule par exemple.* »

Un futur AlphaFold 4 s'attellera sans nul doute à résoudre ces problèmes qui échappent encore à l'expertise de l'algorithme, mais il ne faut pas oublier que l'outil utilise, met à profit et s'appuie sur les travaux réalisés par des humains. Or, les sucres, les lipides sont des molécules qui ont été beaucoup moins étudiées et pour lesquels les travaux sont plus parcellaires. Comme le fait remarquer avec malice Yves-Henri Sanejouand : « *Si demain une météorite apportait sur Terre une protéine faite avec des acides aminés inconnus, AlphaFold ne pourrait rien en tirer…* » ■ **Hervé Ratel**

CHAMP DE RECHERCHE

Des protéines d'un genre nouveau

Un tiers du prix Nobel de chimie 2024 a été décerné à l'Américain David Baker, dont l'objectif est de concevoir de nouvelles protéines. Un champ de recherche qui est en train d'exploser avec AlphaFold. Dans son laboratoire, David Baker et ses collaborateurs mettent au point une boîte à outils de blocs de construction de protéines pour simplifier la mise au point de nouveaux matériaux. « *Un autre design de protéine potentiellement utile, comme l'explique une publication récente, pourrait être de combiner les fragments de trois protéines différentes provenant d'un virus,* explique Marcin Suskiewicz, chercheur au CNRS. *Cette protéine artificielle, qui n'existe pas dans la nature, serait capable d'immuniser fortement une personne contre le virus en suscitant une réponse immunitaire plus forte que ne le ferait un seul fragment. Or, les trois fragments doivent être disposés correctement pour être efficaces, ce qui n'est possible qu'en sachant prédire et contrôler la structure 3D de cette protéine artificielle. Ce que permet justement AlphaFold.* »



ChatGPT au menu de nos repas ?

L'intelligence artificielle est déjà utilisée par les industriels pour concevoir de nouvelles recettes. Elle peut aussi servir d'assistant culinaire et encourager le grand public à faire des choix alimentaires plus sains.

Des champs à notre assiette, l'intelligence artificielle pourrait radicalement transformer notre rapport à l'alimentation en offrant des solutions personnalisées visant à une alimentation plus équilibrée. Au point de remplacer l'expertise des nutritionnistes ? C'est ce que pourrait laisser penser un test proposé en 2023 par le site Web français jeuxvideo.com. En demandant à un professionnel et à ChatGPT d'élaborer un menu sur mesure pour un sportif, le verdict est sans appel : c'est le menu proposé par l'IA qui a été choisi par un jury constitué de deux nutritionnistes bien réels. Prudence, toutefois, car si les outils fondés sur l'IA peuvent aider à soutenir une démarche de santé, ils ont aussi leurs limites.

Mieux équilibrer son assiette

Diverses applications de suivi nutritionnel (Foodvisor, SnapCalorie, Calorie Mama, etc.) mettent à contribution l'appareil photo de son smartphone pour aider à manger mieux, sans avoir à lire des informations nutritionnelles. L'image de l'assiette ou du repas est transmise à une vaste base de données dont les algorithmes d'apprentissage automatique calculent la taille des portions, l'apport calorique, la valeur nutritionnelle de chaque aliment, etc. Ces applications peuvent aussi apporter des conseils nutritionnels personnalisés adaptés aux besoins ou aux objectifs de chacun, comme la perte de poids.

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

Si certaines peuvent encourager des choix alimentaires plus éclairés et plus sains, attention à ne pas tomber dans l'excès. Se fier systématiquement à son portable pour choisir tel ou tel menu pourrait favoriser le développement de troubles du comportement alimentaire en se focalisant, par exemple, de façon exagérée sur l'apport calorique, ou bien faciliter une déconnexion face à ses propres envies culinaires, occultant le fait que bien manger comporte aussi une notion de plaisir.

Des assistants culinaires virtuels

Certains outils intègrent désormais des assistants virtuels (Chefbot, ChefGPT, NutriChef, etc.) alimentés par l'IA. Ces nouveaux assistants culinaires facilitent la planification et la préparation des repas en les rendant plus ludiques, et peuvent même être une source de motivation pour cuisiner de façon plus équilibrée. Grâce à des algorithmes avancés capables d'analyser les préférences alimentaires ou les recettes que nous consultons, l'IA peut proposer des menus sur mesure, adaptés à nos besoins nutritionnels, ou bien encore à nos allergies et restrictions alimentaires choisies ou imposées (végétarisme, intolérance au gluten, etc.). Certaines applis (Yummly) suggèrent également des recettes selon les préférences culinaires à partir des ingrédients disponibles dans la cuisine.

Sensibiliser à l'éducation nutritionnelle

Utiliser l'IA pour évaluer ses connaissances nutritionnelles, comme avec NutriLearn, et proposer des leçons pour les enrichir est aussi possible. Mais l'IA est-elle toujours de bon conseil ? Des travaux récents menés par l'université Loughborough (Royaume-Uni) présentés lors des rencontres internationales du British Feeling and Drinking Group à Cambridge, ont évalué sa capacité à répondre à des questions d'adolescents concernant l'alimentation, l'apparence physique ou des problèmes de poids. Conclusion : l'IA aurait la capacité de donner la plupart du temps des réponses pertinentes et adaptées en fonction de l'âge. Toutefois, elle semble rencontrer des difficultés pour traiter les questions les plus sensibles, comme la perte de poids. Selon les auteurs, l'IA ne pourrait donc pas se substituer aux professionnels de santé, notamment pour les publics adolescents, particulièrement vulnérables.

Créer de nouvelles saveurs

L'industrie alimentaire a compris l'intérêt de l'IA pour innover et répondre aux goûts des consommateurs. En utilisant des algorithmes d'analyse des tendances et de prédiction des goûts, les industriels sont désormais en mesure de concevoir de nouvelles recettes. À l'exemple de l'entreprise suisse Vivi-Kola qui a demandé à ChatGPT de créer une boisson fraîche à partir d'ingrédients naturels. Le groupe Bel, lui, s'est associé à la start-up américaine Climax Food, qui s'appuie sur l'IA pour développer des versions végétales de ses fromages phares. Toutes les caractéristiques du fromage classique (odeur, goût, texture en bouche…) ont été mesurées en laboratoire ; à partir de ces résultats, l'IA a établi une recette combinant certaines des 10 000 plantes (lentilles corail, pois cassés, avoine, etc.) de sa base de données. Deux semaines ont suffi pour recréer une version végétale d'un des fromages emblématiques de la marque, là où il faut souvent des mois ou des années avec les procédés traditionnels. ■

Sylvie Boistard

CONSOMMATION

Limiter le gaspillage alimentaire

En 2022, la France a produit 9,4 millions de tonnes de déchets alimentaires, dont 43 % étaient encore comestibles (produits abîmés, restes de repas, etc.). Pour en limiter l'ampleur, certains industriels ont trouvé la parade : intégrer caméras et capteurs utilisant l'IA aux réfrigérateurs domestiques (Samsung, LG…). Ces dispositifs surveillent en continu les stocks alimentaires afin d'alerter le consommateur sur les produits proches de la date de péremption et ainsi les inciter à les consommer en priorité. En restauration collective et dans les cantines scolaires, réduire le gaspillage est aussi devenu possible grâce à l'IA. La start-up française Kikleo, par exemple, a développé des bornes dotées d'une caméra et dont l'algorithme analyse les restes de nourriture, le poids, le coût financier ou encore l'empreinte carbone d'un plateau-repas. Le restaurateur peut ainsi établir en temps réel un bilan du gaspillage par plateau et, finalement, mieux gérer les ressources alimentaires en réajustant les quantités de certaines recettes et en évitant des aliments qui ne plaisent pas.

THE YAMAGATA UNIVERSITY INSTITUTE OF NASCA

Ces géoglyphes appartiennent aux 303 nouveaux dessins géants, vieux de 2000 ans environ, trouvés dans le désert de Nazca, au sud du Pérou, grâce à un modèle d'IA formé pour repérer leurs contours dans les images satellite.

Archéologie

Une fabuleuse moisson de découvertes

Vestiges enfouis sous les sables, sites mayas masqués par la jungle, géoglyphes péruviens… Depuis quelques années, des systèmes d'intelligence artificielle sont parvenus à repérer les informations pertinentes dans l'énorme masse de données collectées par télédétection. Une aide précieuse pour orienter les fouilles des archéologues.

Par Marine Benoit

Télédétection, nom féminin : technique d'acquisition à distance d'informations sur la surface terrestre ou de surveillance d'un point d'intérêt. Voilà maintenant plusieurs décennies que l'archéologie exploite ce vaste champ technologique qu'est la télédétection pour collecter des données sur des sites sans avoir besoin de fouiller physiquement le terrain. Le lidar (light detection and ranging), un appareil qui utilise des faisceaux laser pour mesurer les distances et créer des cartes en 3D de la surface terrestre, les radars à pénétration de sol, la photogrammétrie, l'imagerie aérienne ou satellite ou encore l'analyse thermique ont ainsi rendu possibles d'incroyables découvertes parmi lesquelles, en 2017, celles de tombes, vestiges de temples et autres structures enfouies dans la vallée de Saqqarah, en Égypte, qui avaient échappé aux fouilles traditionnelles. En 2018, le lidar avait là encore permis de mettre au jour un immense réseau de cités mayas cachées sous la jungle guatémaltèque, avec plus de 60 000 structures identifiées.

Néanmoins, si elle a su se rendre indispensable dans le domaine, la télédétection a vite posé une limite : la quantité de données qu'elle fournit est bien trop importante pour les archéologues qui se doivent de visualiser et d'interpréter eux-mêmes les images. C'est pourquoi, depuis quelques années, plusieurs projets de recherche ont été consacrés à la mise au point de systèmes d'intelligence artificielle capables d'aider à faire ce « tri » dans les informations collectées par télédétection. Et même si aucun d'entre eux n'exclut, là encore, l'interven- ▶

ANALYSE DE DONNÉES

D'autres champs d'investigation prometteurs

Si elle ne permet pas encore de déclencher systématiquement des fouilles dans les endroits où elle est exploitée, l'intelligence artificielle a dernièrement mis les archéologues sur plusieurs pistes qu'ils pourraient être amenés à suivre. Grâce à l'analyse automatisée de cartes lidar, des réseaux de fossés et des structures datant du néolithique ont été mis en évidence en Europe de l'Est et en Allemagne. De la même manière, l'Amérique centrale est une zone archéologique au sein de laquelle l'intelligence artificielle s'apprête à jouer un rôle considérable. Au cours de la dernière décennie, l'usage croissant des satellites équipés de lidar ont permis de révéler, sous la dense végétation de la péninsule du Yucatán (Mexique), au Guatemala ou encore au Belize, des dizaines de milliers de structures et traces d'aménagement du territoire liées à la civilisation maya.

tion humaine — que tous les chercheurs qualifient d'indispensable pour arriver à des résultats satisfaisants —, ces IA sont en passe d'allonger de façon vertigineuse la liste des sites archéologiques identifiés mais encore inexplorés. Luca Casini, chercheur en intelligence artificielle à l'université de Bologne, en Italie (aujourd'hui affilié au KTH Royal Institute of Technology de Stockholm, en Suède), fait partie des scientifiques qui ont réfléchi au cours de ces dernières années au potentiel de l'apprentissage automatique — ou *deep learning* — en matière d'archéologie. Entraîné à détecter des sites archéologiques déjà connus sur des images satellitaires couvrant une zone de 66 000 kilomètres carrés dans la plaine inondable du sud de la Mésopotamie, son algorithme a obtenu un taux de précision de près de 80 % lorsqu'il s'agissait de répondre à la question : *« À quel endroit les archéologues devraient-ils fouiller ? »*
« Notre objectif n'était pas de créer un système parfait, mais plutôt un système capable de sélectionner rapidement les endroits qui "ressemblent à des sites", de sorte que l'expertise et l'énergie humaines ne soient pas gaspillées dans l'étude de zones extrêmement vastes, explique Luca Casini. *Bien sûr, l'intervention humaine reste indispensable, de nombreux facteurs entrant en ligne de compte pour décider que ce qui ressemble à une petite colline sur une photo satellite est en fait un site archéologique. »* Depuis 2021, le projet Cultural Landscapes Scanner (CLS), né de la collaboration entre l'Institut italien de technologie, à Gênes, et l'Agence spatiale européenne (ESA), œuvre lui aussi à affiner la détection de sites par l'IA à partir d'images satellitaires. Prévu pour durer jusqu'à la fin de l'année 2024, CLS devrait communiquer ses résultats prochainement. Certains projets, néanmoins, ont déjà fait concrètement leurs preuves et conduit très récemment à d'extraordinaires découvertes.

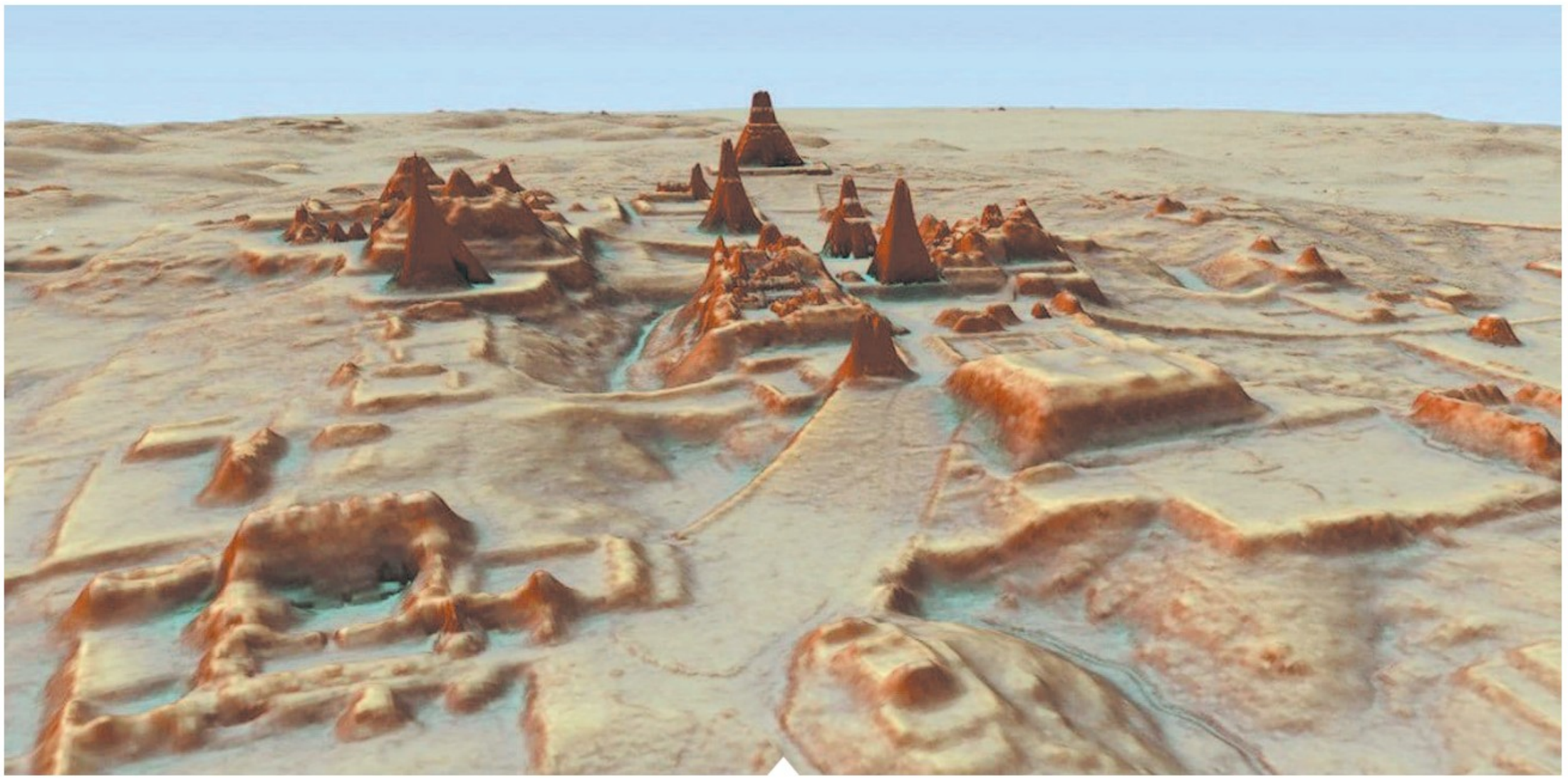
LUCA CASINI

« Notre objectif était de créer un système capable de sélectionner rapidement les endroits qui "ressemblent à des sites" »

Luca Casini, chercheur en intelligence artificielle au KTH Royal Institute of Technology de Stockholm (Suède)

Une myriade de nouveaux géoglyphes de Nazca

Le 23 septembre dernier, lors d'une conférence de presse organisée à l'ambassade du Japon à Lima, au Pérou, Masato Sakai, archéologue à l'université de Yamagata (Japon), annonçait l'une des plus grandes avancées de ces dernières années dans le domaine de l'archéologie précolombienne. *« La recherche accélérée par l'IA a permis d'identifier 303 nouveaux géoglyphes de Nazca en six mois de travail sur le terrain »*, lançait-il. Un chiffre qui donne le vertige lorsque l'on sait que depuis leur découverte il y a près d'un siècle dans le désert de Nazca, à 400 kilomètres au sud de Lima, 430 figures avaient été répertoriées. En somme, le nombre connu de ces mystérieux dessins tracés dans le sable il y a plus de 2000 ans par les Nazcas, civilisation pré-inca qui s'est développée entre le IIIe siècle avant notre ère et la fin du VIIIe siècle, a doublé en quelques mois ! L'équipe de Masato Sakai, qui étudie la zone de 630 km² depuis 2004, l'a photographiée morceau par morceau en haute résolution et en vue aérienne grâce à des avions et des drones. Elle a ensuite soumis ces clichés à un programme d'apprentissage artificiel mis au point avec IBM pour débusquer des tracés difficilement détectables par des yeux humains. Plus spécifiquement, pour identifier des géoglyphes figuratifs linéaires, c'est-à-dire représentant des animaux, des humanoïdes, des objets ou des plantes



PACUNAM/MARCELLO CANUTO & LUKE AULD-THOMAS

Un immense réseau de cités mayas a été découvert sous la jungle guatémaltèque en 2018 grâce aux images lidar (ici la cité de Tikal, qui s'est révélée trois à quatre fois plus grande que ce qu'on pensait). Avec d'innombrables données en cours d'analyse.

(d'autres motifs sont seulement des lignes ou des formes géométriques et sont dénommés géoglyphes géométriques). Hélas, l'IA n'est pas encore apte à percer le mystère de leur signification, l'un des plus grands qui subsistent aujourd'hui en archéologie.

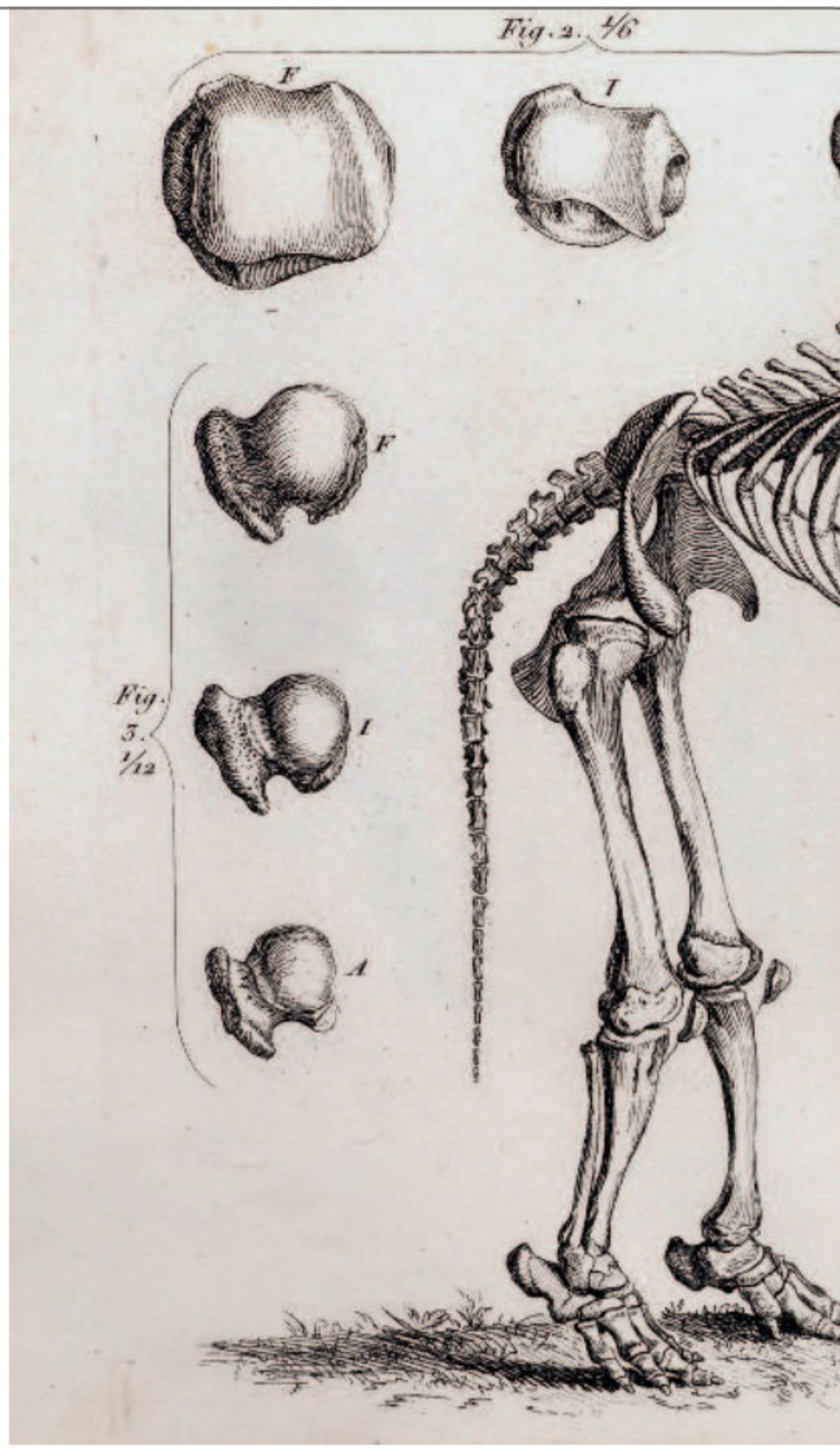
Des vestiges sous le sable du désert saoudien

Fouiller des dunes est un véritable cauchemar pour les archéologues. D'abord parce qu'il est difficile de distinguer à leur surface des indices de présence de vestiges ; ensuite parce que creuser le sable renvoie au mythe de Sisyphe : presque aussitôt faits, les trous finissent par se remplir à nouveau. Par ailleurs, dans un environnement aussi extrême, les méthodes traditionnelles d'exploration par relevés de terrain sont fastidieuses et, hélas, souvent inefficaces. Le désert de Rub al-Khali (péninsule Arabique), le plus grand désert de sable du monde avec ses 650 000 kilomètres carrés, est donc un casse-tête archéologique. Pour tenter de mettre la main sur quelques-uns des trésors qu'il recèle encore, une équipe de l'université Khalifa d'Abu Dhabi a développé une méthode d'investigation inédite : la combinaison d'une imagerie par radar à synthèse d'ouverture (SAR) — une technologie qui utilise des ondes radio pour détecter des objets dissimulés sous différents types de surface — et d'un algorithme de *machine learning*. La prospection a été concentrée sur Saruq al-Hadid, un site archéologique proche de Dubai (Émirats arabes unis) où des traces d'activité remontant à 5000 ans ont été découvertes. L'algorithme a permis d'y localiser avec une précision de 50 centimètres de nouvelles zones d'intérêt qui n'ont pas encore été explorées, et a même pu générer des modèles 3D des objets enfouis. Ainsi, une véritable cartographie de structures architecturales, de céramiques et même d'artefacts métallurgiques a été obtenue sur une surface d'un kilomètre carré. Des fouilles devraient prochainement débuter pour sortir du sable ces trésors.

De probables tombes de rois dans les steppes eurasiennes

En 2019, à partir d'images satellite, des chercheurs des universités de Sydney (Australie) et de Berne (Suisse) ont exploité des réseaux neuronaux convolutifs (CNN) pour détecter des vestiges de l'âge du fer ancien dans les steppes de Russie, de Chine et de Mongolie, des régions difficiles d'accès en raison notamment de restrictions administratives et de conflits locaux. Contrairement aux méthodes d'apprentissage automatique classiques, les CNN exploitent les relations entre pixels adjacents, permettant de détecter des motifs subtils dans des images complexes. Gino Caspari, archéologue et premier auteur de l'étude, a ainsi pu repérer ce qui ressemble à des tumulus funéraires encore non répertoriés, dont certains pourraient abriter la dépouille d'anciens rois nomades ayant régné il y a plus de 3000 ans. Bien sûr, seules des investigations sur le terrain permettront de confirmer ou d'infirmer la nature royale de ces reliefs. ■

Un logiciel comble les lacunes des archives fossiles



L'IA de DeepDive est capable de reconstruire les écosystèmes anciens qui ont échappé aux fouilles ou qui sont situés dans des zones peu explorées.

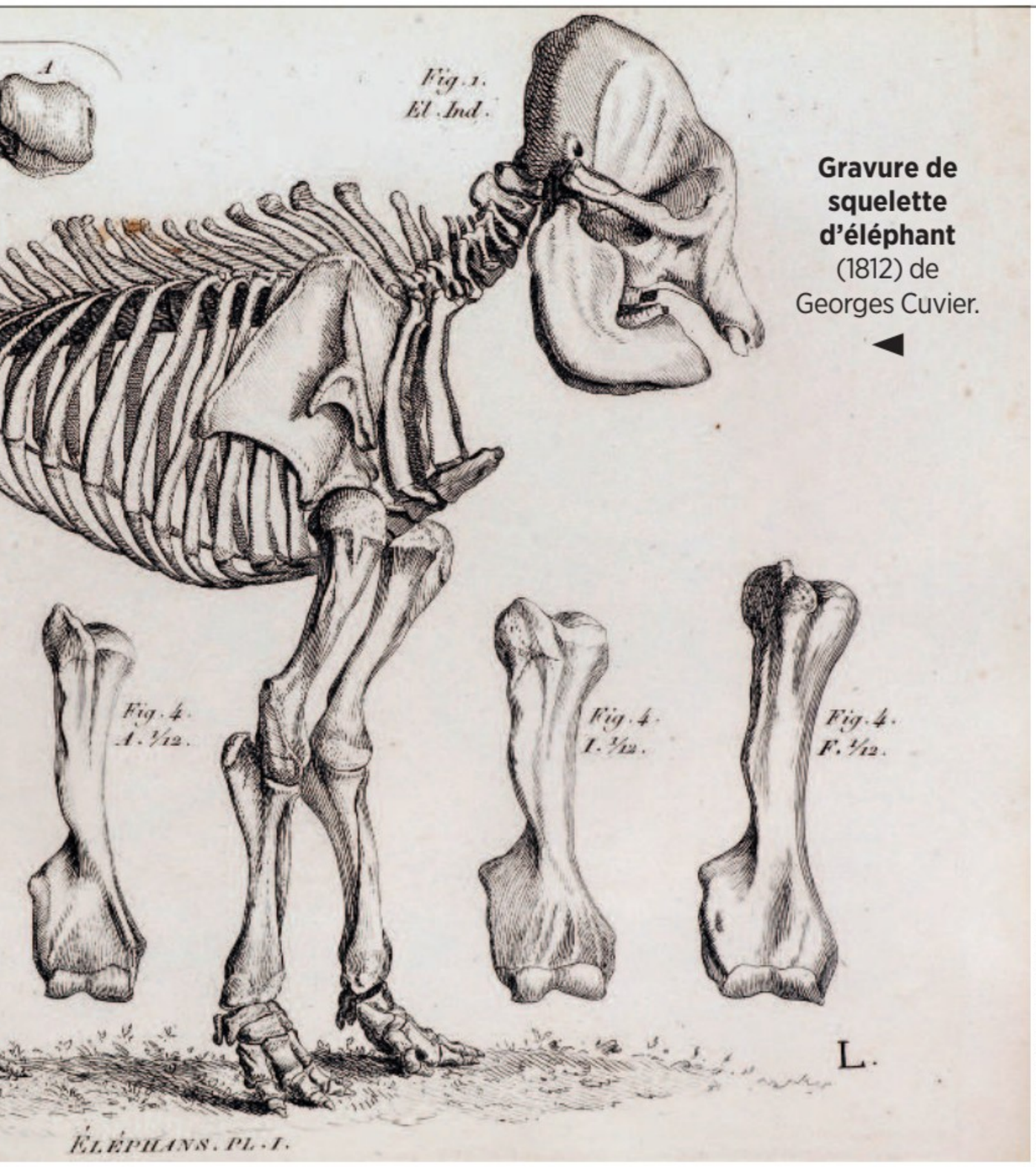
L'histoire est pleine de trous, de vides, d'interrogations. Même celle des humains, si riche et documentée soit-elle, recèle des mystères et des lacunes, notamment pour les civilisations qui n'ont pas laissé de traces écrites. Mais en comparaison, l'étude des animaux et des formes de vie du passé est confrontée à de véritables gouffres. D'abord, en raison du très grand nombre d'espèces à prendre en compte, mais aussi de la longueur de la période à prospecter. Avec près de quatre milliards d'années, l'échelle du défi dépasse de loin celle des études historiques humaines. L'intelligence artificielle, en combinant données génétiques, environnementales et modélisations prédictives, offre une nouvelle façon de résoudre ce problème. Pour rendre compte de l'évolution de la vie sur Terre, les spécialistes se reposent principalement sur les archives fossiles. Ces dernières présentent pourtant des biais intrinsèques, car elles favorisent les espèces de grande taille ou celles dotées de structures osseuses denses, qui se conservent mieux au fil du temps. De plus, certains événements géologiques ou climatiques, comme les périodes glaciaires, compromettent la fossilisation. « *Avec les méthodes traditionnelles, il est difficile d'obtenir une représentation précise de la diversité réelle, surtout dans les zones peu explorées, tandis que certaines régions comme l'Amérique du Nord et l'Europe sont surreprésentées* », souligne Rebecca Cooper, membre du Swiss Institute of Bioinformatics (SIB). Aussi la chercheuse a-t-elle développé le logiciel DeepDive, conçu pour établir de nouvelles estimations de la paléodiversité et ainsi faire surgir des modèles des formes de vie inconnues. Comme ces nombreuses espèces d'éléphants disparues sans laisser de traces et qui vivaient il y a seulement 15 millions d'années *(lire l'encadré)*.

Avec DeepDive, l'IA n'est pas, pour une fois, utilisée pour digérer des quantités massives de données, mais pour en créer là où celles-ci n'existent pas. Néanmoins, il faut alimenter le pro-

REBECCA COOPER

« Avec les méthodes traditionnelles, il est difficile d'obtenir une représentation précise de la biodiversité réelle »

Rebecca Cooper, membre du Swiss Institute of Bioinformatics (SIB), développeuse du logiciel DeepDive



Gravure de squelette d'éléphant (1812) de Georges Cuvier. ◄

PAUL D STEWART/SPL/ AKG IMAGES

PHYLOGÉNIE

Où sont passés les éléphants ?

DeepDive s'est penché sur le groupe des proboscidiens, qui comprend les éléphants et les espèces apparentées comme les mammouths, dont les premiers représentants datent du paléocène, il y a environ 60 millions d'années. Au départ, leur diversité est faible et a progressivement augmenté pour s'accélérer avec l'expansion hors d'Afrique, grâce à la formation d'un pont terrestre entre ce continent et l'Asie. La diversité des proboscidiens a culminé après l'optimum climatique du miocène (il y a 17 à 15 millions d'années), avec 37 à 75 espèces présentes qui se partageaient l'espace en fonction de leurs préférences écologiques, avant de décliner graduellement. Aujourd'hui, avec seulement trois représentants, ce groupe a subi une réduction drastique qui illustre une extinction massive bien plus importante que ce que les méthodes classiques laissaient penser.

gramme et l'entraîner. Ainsi, le logiciel combine des milliers d'histoires évolutives simulées, des filtres reposant sur les archives fossiles réelles et un modèle d'apprentissage profond qui s'appuie sur des réseaux de neurones récurrents à mémoire de long terme. L'objectif est de « *générer des fossiles dans les périodes ou les régions où les données manquent, et ainsi reconstruire la diversité biologique passée* », explique la scientifique.

Deux grandes périodes d'extinction étudiées

Les résultats des premiers tests confirment ce que les paléontologues savaient déjà : bien plus d'espèces ont vécu sur Terre que ce que suggèrent les restes découverts. DeepDive a également permis d'étudier deux grandes périodes d'extinction : celle de la fin du permien, il y a 252 millions d'années, et celle survenue à la fin du trias, il y a 201,3 millions d'années. Surprise : alors que la première est habituellement considérée comme la plus dramatique, le logiciel pose l'inverse : 58 à 24 % des genres ont disparu au permien, contre jusqu'à 66 % au trias.

D'ores et déjà en accès libre pour les scientifiques, DeepDive est cependant encore loin d'être complètement abouti. S'il tient compte de facteurs tels que la dispersion et l'adaptabilité du vivant, il ne peut pas encore évaluer les complexes interactions qui existent entre les espèces, comme la compétition ou les relations de prédation. Cependant, il semble déjà suffisamment rodé pour révéler des tendances globales de la biodiversité souvent invisibles avec les méthodes conventionnelles.

Au-delà de sa capacité à reconstruire les écosystèmes anciens, DeepDive offre une solution nouvelle pour étudier la crise climatique actuelle. « *Les modèles utilisés pour prédire l'évolution future de la biodiversité s'appuient sur les archives fossiles afin de calibrer leurs réponses,* souligne la chercheuse. *Si nous parvenons à affiner les estimations de la biodiversité du passé, ce calibrage pourra être amélioré.* »

Toutefois, la majorité des espèces actuellement menacées d'extinction le sont du fait de leur exploitation ou de la réduction de leur zone d'habitat. Autant de facteurs anthropiques qui « *n'ont pas d'équivalent dans le passé évolutif* ». Mais, là aussi, le logiciel peut servir « *à quantifier l'ampleur réelle des extinctions d'espèces récentes dont la disparition est attribuable à l'humain* ». En portant un regard rétrospectif, DeepDive pourrait bien devenir un outil essentiel pour préserver le futur. ■

Joël Ignasse

POUR EN SAVOIR PLUS

L'étude de *Nature* (en anglais) sur les résultats de DeepDive : **sciav.fr/935deepdive**

Dartmouth, 1956 : la naissance de l'intelligence artificielle

Le colloque réuni au collège de Dartmouth, aux États-Unis, a lancé le terme « intelligence artificielle » et rassemblé sous cette étiquette une grande variété de recherches, attirant des soutiens financiers qui ont permis l'expansion quasi continue de cette nouvelle discipline.

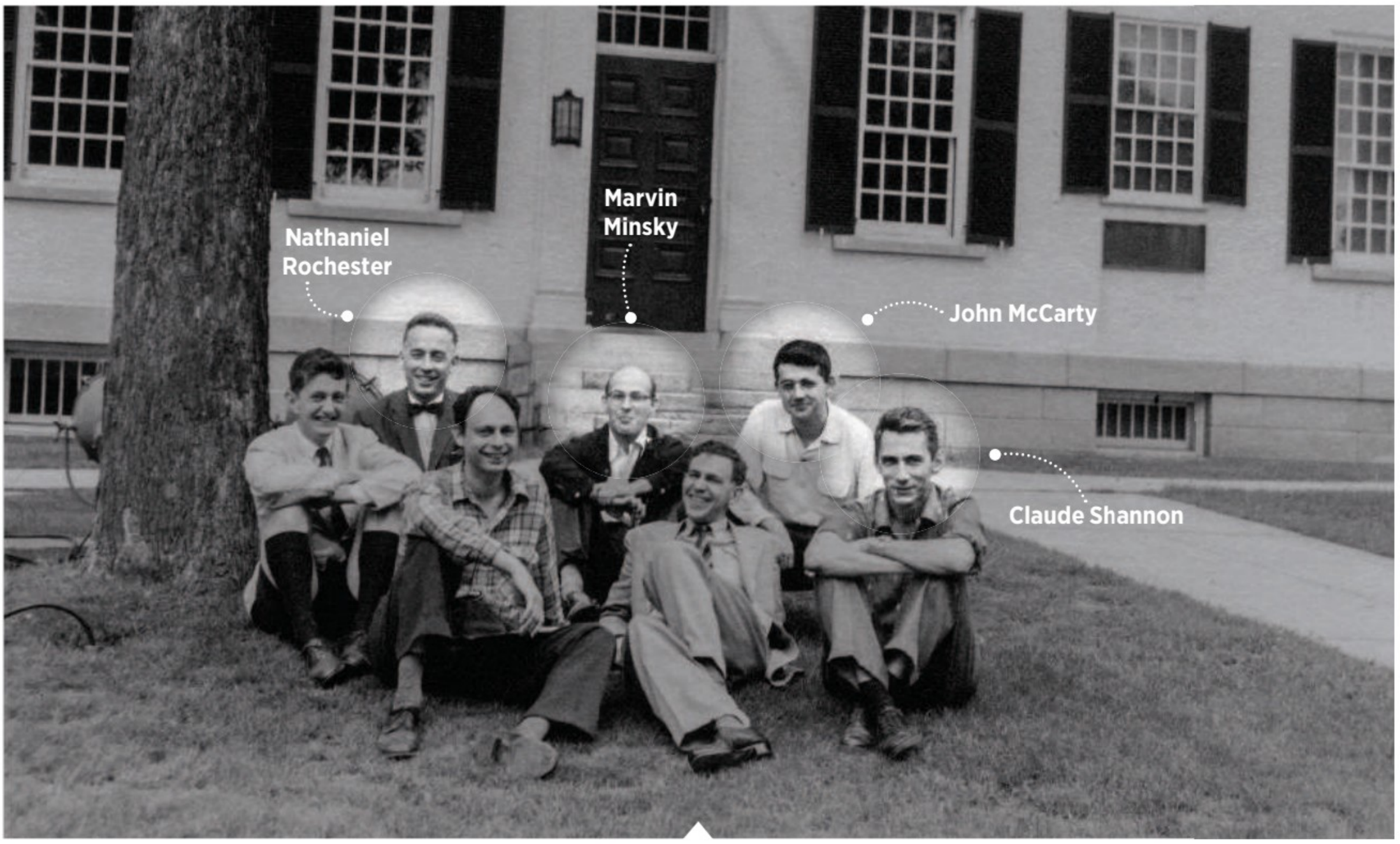
Par Pierre Mounier-Kuhn

La naissance de l'IA offre un parfait exemple d'un mouvement d'innovation issu, non du cerveau génial d'un inventeur isolé, mais au contraire d'un collectif, d'un groupe de chercheurs et d'ingénieurs réunis autour d'un projet commun. Venus de divers environnements professionnels, ils sont sortis de ces quelques semaines de discussions intenses au collège de Dartmouth (New Hampshire, États-Unis) en 1956 avec des perspectives de recherche profondément enrichies et des soutiens financiers considérables pour les explorer. Une nouvelle communauté scientifique s'est constituée, sous-ensemble un peu marginal d'une « computer science » elle-même en construction. Esquissons rapidement le paysage intellectuel dans lequel se forment ces chercheurs. Le bouillonnement cybernéticien est né de rencontres interdisciplinaires, souvent dans le cadre de collaborations pour concevoir des systèmes d'armes pendant la guerre : électriciens, mécaniciens, biologistes, psychologues, mathématiciens, voire anthropologues se découvrent des problèmes similaires dans les mécanismes d'interaction et de régulation des systèmes naturels ou artificiels *via* le contrôle et la rétroaction. Mécanismes que l'on peut analyser grâce à des modèles mathématiques communs. Conférences et clubs cybernétiques se multiplient, stimulés à partir de 1948 par la publication de *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine* du mathématicien américain Norbert Wiener, professeur au Massachusetts Institute of Technology (MIT). C'est dans ce contexte que l'on commence à parler de « cerveaux électroniques » et de « machines pensantes ». L'année suivante paraît *Giant Brains, or Machines That Think*, d'Edmund Berkeley. En 1951, le CNRS organise à Paris un congrès international sur « Les machines à calculer et la pensée humaine » où, devant Norbert Wiener, le neurophysiologiste William Grey Walter fait évoluer son robot-tortue Elsie, capable de simuler un comportement autonome.

Auparavant, le mathématicien John von Neumann a défini dans un rapport de 1945 une nouvelle architecture de machine à calculer, l'ordinateur. Il en décrit les composants en les comparant aux neurones. Voulant poser les bases d'une théorie de cette machine, il mène ensuite des travaux sur les automates auto-reproducteurs, et propose un véritable programme de recherches sur ces objets

PIERRE MOUNIER-KUHN

Historien, Pierre Mounier-Kuhn est spécialisé dans l'histoire de l'informatique (CNRS, Sorbonne université et CentraleSupélec). Il participe aux travaux de l'ANR CulturIA. Dernier ouvrage paru : *Histoire illustrée de l'informatique*, EDP Sciences, 2021.



THE MINSKY FAMILY

scientifiques futuristes. Le fait qu'un ordinateur puisse modifier son programme et prendre ainsi des décisions autonomes évoque une forme d'intelligence dans la machine. L'association de ces deux mots suscite des discussions passionnées.

L'ordinateur, objet de recherches au-delà du calcul numérique

Autre pionnier de la conception d'ordinateurs, le mathématicien britannique Alan Turing s'intéresse lui aussi à la cybernétique et réfléchit à la possibilité qu'un ordinateur puisse apprendre ou jouer aux échecs. Il publie en 1950 « Computing Machinery and Intelligence » dans la revue *Mind*, proposant de simplifier le problème : l'intelligence humaine étant difficile à définir, Alan Turing recommande de déterminer si une machine peut être qualifiée d'intelligente simplement en lui faisant simuler un comportement intelligent. Le « jeu de l'imitation » consiste à comparer « en aveugle » une machine et un être humain, lors d'un dialogue par machines à écrire connectées : si un observateur extérieur n'arrive pas à discerner qui est la machine et qui est l'être humain, la machine peut être considérée comme intelligente.

Le Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence réunit à Hanovre (États-Unis), durant l'été 1956, 20 des plus brillants chercheurs en sciences cognitives et informatique. Ce colloque est considéré comme l'événement fondateur de l'intelligence artificielle.

Au début des années 1950, les premiers ordinateurs sont entrés en service, parallèlement à bien d'autres dispositifs électroniques de calcul ou d'automatisme. En Amérique comme en Europe, des chercheurs commencent à explorer les possibilités de ces machines au-delà du calcul numérique. En 1955, le logicien John McCarthy, alors assistant de mathématiques au collège de Dartmouth, juge que ces recherches ont assez progressé pour que l'on puisse les confronter dans un colloque, clarifier les approches et développer de nouvelles idées. Il s'associe avec Marvin Minsky, jeune docteur en mathématiques à Princeton qui étudie les réseaux de neurones. Pour donner une légitimité à un projet aussi visionnaire, il sollicite le soutien de deux scientifiques réputés : Nathaniel Rochester, architecte du gros ordinateur IBM 701, qui anime chez IBM un groupe étudiant la programmation, la reconnaissance des formes, la théorie de l'information et de la commutation ; et Claude Shannon (Bell Laboratories), auteur de la théorie de l'information, qui s'intéresse à l'analogie entre circuits de commutation et système nerveux. John McCarthy obtient de la Fondation Rockefeller 7 500 dollars pour financer une école

d'été pendant deux mois. Pour la désigner, John McCarthy invente le terme « intelligence artificielle ». Le projet de cinq pages présente une nouvelle façon d'étudier les facultés cognitives humaines à travers des machines. *« L'étude se fonde sur la conjecture que chaque aspect de l'apprentissage ou de tout autre caractéristique de l'intelligence peut être décrit en principe si précisément qu'une machine puisse être conçue pour le simuler. On essaiera de découvrir comment amener des machines à utiliser le langage, à former des abstractions et des concepts, à résoudre des problèmes jusque-là réservés aux humains, et à s'améliorer elles-mêmes.* » La proposition ajoute des pistes de recherche : conception d'ordinateurs et de leur théorie, réseaux de neurones formels, capacité d'abstraction et de créativité. Les buts sont donc à la fois ambitieux, théoriques et expérimentaux : mieux comprendre l'intelligence et développer des systèmes capables de la simuler. Mais le projet n'a rien de démiurgique et ne prédit pas un dépassement général des aptitudes humaines.

AP/SIPA

John McCarthy est l'un des premiers à avoir développé des programmes de jeu d'échecs pour ordinateur (ici en 1966 à l'université Stanford, aux États-Unis).

Les participants seront plus de vingt, certains ne restant qu'une ou deux semaines. Tous sont Américains ou Britanniques installés aux États-Unis. Beaucoup ont une double ou triple formation allant des mathématiques et de l'électronique à la psychologie ou au management. Résumer leurs activités, sans les énumérer tous, révèle la diversité des approches et des agendas scientifiques que les initiateurs rassemblent en 1956 sous la bannière de l'IA. Herbert Simon (université Carnegie-Mellon, Pittsburgh) et Allen Newell (Rand Corp., think tank de l'US Air Force) étudient les processus de décision dans les organisations, dans les machines et chez les humains. Ils développent ensemble en 1956 le Logic Theorist, programme d'ordinateur conçu pour produire du raisonnement automatique, considéré comme le premier programme d'intelligence artificielle. Ce système réussit à prouver 38 théorèmes des *Principia Mathematica* d'Alfred North Whitehead et Bertrand Russell (1910-1913) — l'une de ces réussites probantes qui crédibilisent un projet de recherche. Ils réaliseront dans la foulée le General Problem Solver, résolveur universel de problèmes, capable en principe de résoudre n'importe quel problème formalisé, des mathématiques aux échecs.

Le lancement d'un véritable champ d'investigation

Oliver Selfridge, ancien étudiant de Robert Wiener, publie déjà sur la reconnaissance de formes, les réseaux neuronaux et l'apprentissage par machine. Julian Bigelow, électronicien et mathématicien, collaborateur de Wiener et de von Neumann, s'intéresse aux interactions entre machines et êtres vivants, et à leurs aptitudes respectives à poursuivre des buts. Le mathématicien probabiliste Ray Solomonoff étudie l'apprentissage (*machine learning*) et présente à Dartmouth le premier rapport sur ce thème. John Henry Hol-

IMAGINAIRE

L'IA dans les mythes et la littérature

L'idée d'une intelligence artificielle remonte à l'Antiquité. Des légendes racontaient que des objets matériels, des statues, avaient été dotés d'une forme de conscience par des artisans géniaux ou des dieux : technique et magie y étaient indissociables. Des artistes ont donné une certaine réalité à ces mythes en fabriquant des automates. De Héron d'Alexandrie (Ier siècle) à Jacques Vaucanson (XVIIIe siècle) ou Johann Wolfgang van Kempelen (XVIIIe siècle) avec son Turc joueur d'échecs — un faux automate dans ce dernier cas. La littérature a contribué à familiariser les esprits modernes avec ces images : androïdes séduisants des contes d'Hoffmann ou de Villiers de l'Isle-Adam, monstrueux comme le Golem ou le Frankenstein de Mary Shelley, serviables puis révoltés comme les ouvriers robots de Karel Čapek, soumis à des lois humaines dans les romans d'Isaac Asimov. Par ailleurs, d'Aristote à Leibniz, à Babbage et à Boole, des philosophes mathématiciens ont analysé la pensée humaine comme un processus logique de manipulation de symboles, comme une forme élargie du calcul, que l'on pourrait mécaniser. La question de l'intelligence des machines à calculer fut d'ailleurs régulièrement posée dès l'invention de Blaise Pascal. Au milieu du XXe siècle, le développement des calculateurs électroniques, notamment de l'ordinateur, rend possible le passage de l'imaginaire artistique ou philosophique au projet technique et scientifique.

Le colloque de Dartmouth affirme des ambitions scientifiques dont les retombées pratiques paraissent considérables à plus ou moins long terme

land se consacre à l'optimisation et à la théorie des systèmes complexes, à l'interface entre l'informatique, l'électronique et la psychologie.
L'école d'été de Dartmouth a donc organisé la convergence de différents agendas scientifiques, tout en révélant clairement des différences fondamentales dans leurs approches. Elle devient vite l'événement fondateur de l'intelligence artificielle. Elle lance un véritable programme d'investigations dans ce domaine. Elle affirme des ambitions scientifiques dont les retombées pratiques paraissent considérables à plus ou moins long terme. En conséquence, ses participants obtiennent rapidement des financements abondants, notamment des administrations militaires américaines.

Dès 1957, John McCarthy rejoint Marvin Minsky au MIT et y fonde le département d'intelligence artificielle. Il concevra le langage Lisp pour l'IA et jouera un rôle pionnier dans le développement des systèmes d'exploitation et dans la fondation d'une science informatique. Marvin Minsky, d'abord très investi dans les réseaux neuronaux et la reconnaissance des formes par Perceptron, en percevra bientôt les limites et se tournera vers l'approche symbolique de l'IA.
Le General Problem Solver d'Allen Newell et Herbert Simon, approche très ambitieuse, donnera naissance au courant de l'IA « forte », cherchant à mécaniser le raisonnement mathématique, l'une des activités les plus élevées de l'intelligence humaine. Il est à l'origine du développement, vingt ans plus tard, des systèmes experts et d'ordinateurs capables de battre les champions d'échecs — l'un des critères admis, à l'origine, de la réalisation d'une IA. Quant aux travaux sur les réseaux de neurones et sur l'apprentissage, ils subiront des éclipses avant de faire un retour en force appuyé sur l'Internet et la disponibilité de données massives. ■

Une formidable diversité
11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 926 Nouveaux traitements pour vaincre l'insomnie

N° 927 Univers : la première seconde

N° 928 La France à +4 °C Ce qui va changer

N° 929/930 20 questions qui obsèdent les scientifiques

N° 931 La molécule miracle

N° 932 L'ordinateur quantique arrive !

N° 933 Prendre le contrôle de ses rêves

N° 934 Révélations sur les mystères de la Voie lactée

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France).
Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 926 ❑ N° 927 ❑ N° 928 ❑ N° 929/930
❑ N° 931 ❑ N° 932 ❑ N° 933 ❑ N° 934

Nom : .....
Adresse : .....
..... Ville : .....
Code postal : .....

MICHEL RAUCH / BIOSPHOTO

La sterne arctique est l'oiseau qui parcourt la plus grande distance pour effectuer sa migration entre l'Arctique et l'Antarctique, soit un périple aller-retour pouvant dépasser 90 000 kilomètres.

Fascinantes migrations

Ce récit captivant révèle les étonnantes stratégies de milliards d'oiseaux pour rejoindre leur zone d'hivernage. Des voyages épiques qui émerveillent les ornithologues.

ORNITHOLOGIE Selon les estimations, environ 50 milliards d'oiseaux, représentant 19 % des 10 000 espèces du monde, migrent annuellement à longue distance — sur plusieurs milliers voire dizaines de milliers de kilomètres! Scott Weidensaul nous immerge au cœur de ces exploits, accomplis par des volatiles qui ne pèsent parfois que quelques dizaines de grammes et qui, pourtant, sont capables d'endurer les conditions les plus rudes (océans déchaînés, ouragans, etc.). La massification des registres de baguage, la miniaturisation des outils de télédétection, les avancées de l'informatique (en intelligence artificielle et dans le traitement d'immenses ensembles de données, en particulier) — toutes évolutions que ce livre détaille avec pédagogie — permettent de suivre de plus en plus précisément ces odyssées. Ce récit captivant nous fait aussi découvrir les étonnantes stratégies mises en place par les oiseaux pour réussir leurs trajets épiques. Imaginez, par exemple, que certains de ces animaux modifient leurs organes internes en prévision de leur périple, ou endorment alternativement l'une ou l'autre moitié de leur cerveau pour se reposer, tandis qu'ils volent des jours, des semaines, des mois!

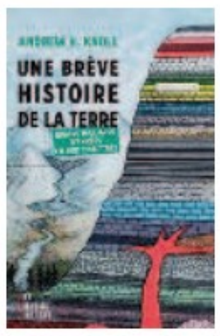
Ces découvertes sont évidemment le fait des ornithologues. L'opiniâtreté dont ils font preuve pour préserver ce spectacle fascinant est d'autant plus remarquable que les vents contraires s'accumulent : changements climatiques, fragmentation des zones d'étape, pesticides, etc. Ces personnages, finalement, sont à l'image des bêtes pour lesquelles ils se passionnent : admirables de détermination et de courage. ■ **Vincent Glavieux**

Le Monde à tire-d'aile, Scott Weidensaul, Actes Sud, 496 p., 24 €

SOMMAIRE

▶ C'est à lire p. 90
▶ C'est à voir p. 92
▶ Chroniques p. 94
▶ Questions de lecteurs p. 96
▶ Le ciel du mois p. 97
▶ Jeux p. 98

La Terre et ses secrets



PORTRAIT Andrew Knoll, spécialiste de géophysique et des extinctions de masse, raconte dans un essai d'une remarquable clarté l'histoire de notre planète. Depuis sa formation jusqu'aux déséquilibres provoqués par le réchauffement global. Le point de vue de l'auteur est captivant car, développé à l'échelle de milliards d'années, il est mû par une nécessité : comprendre de quoi notre habitat est fait et comment les grands bouleversements se sont produits, afin d'appréhender les enjeux de sa préservation. **A. De B.**

Une brève histoire de la Terre, Andrew Knoll, Les Liens qui libèrent, 260 p., 22,50 €

Intelligence animale

BD Qu'est-ce que l'intelligence ? Cette question est le fil conducteur de cette BD humoristique qui tente de départager les animaux, humains compris. Si l'on compare, par exemple, le nombre de neurones par gramme de cervelle, l'humain arrive en septième position

derrière la pieuvre, l'abeille, le corbeau, la mouche… L'empathie, la conscience de soi…, de nombreuses facettes de l'intelligence humaine sont partagées par les animaux. Un livre indispensable pour regarder les bêtes d'un nouvel œil. **S. R.**

L'Animal le plus intelligent du monde, Gilles Macagno, Delachaux et Niestlé, 96 p., 19,90 €

Au plus près de la matière

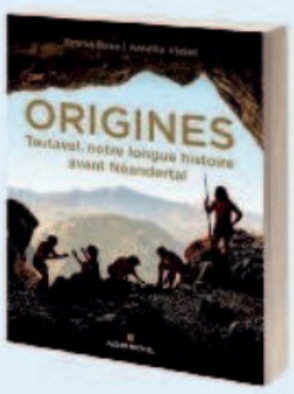
PIONNIERS Curie, Planck, Schrödinger, Einstein, Oppenheimer… Ces « maîtres de l'atome » content une aventure scientifique extraordinaire : la naissance de la physique quantique. Cette épopée dévoile les coulisses de cinquante années de révolutions scientifiques, de la radioactivité à la bombe atomique. L'occasion de redécouvrir le génie de ces sommités, mais aussi leurs échecs académiques, amours, amitiés, doutes et convictions politiques. **A. C.**

Les Maîtres de l'atome, Tobias Hürter, Les Arènes, 393 p., 24 €

Une odyssée géographique

BD C'est à bord d'une montgolfière que Ptolémée, dépeint en vieux bougon en quête de reconnaissance, remonte le temps à la recherche des traces laissées par son traité — *La Géographie* — dans les travaux de célèbres successeurs. Sur une Anti-Terre appelée paradis, sont regroupés par époque et par lieu tous les savants dignes de souvenir. Jolie trouvaille qui permet de passer en revue la fascinante évolution de la cartographie. Au croisement des mathématiques, de la philosophie, de la physique et de l'astronomie, on survole la mesure de la circonférence de la Terre par Ératosthène, la carte de Fra Mauro — qui, à la Renaissance, représente pour la première fois l'Amérique —, Cassini et sa triangulation, la photogrammétrie, le GPS… Et, au bout de ce vertigineux voyage, Ptolémée plaide pour le doute et la spéculation, qui font le sel de la science à l'ancienne ! **Andreina De Bei**

Geographia. L'odyssée cartographique de Ptolémée, Jean Leveugle avec Emmanuelle Vagnon, Futuropolis et BNF Éditions, 160 p., 23 €



Qui était l'homme de Tautavel ?

EUROPÉENS La plus ancienne trace humaine d'Europe a été découverte en 1971 non loin du village de Tautavel, dans une vaste grotte s'ouvrant dans le massif des Corbières. Le fossile Arago 21, aussi connu sous le nom de « l'homme de Tautavel », et les autres fossiles humains découverts dans le même réservoir seront plus tard attribués à *Homo heidelbergensis*, qui vivait en Europe autour de 450 000 ans avant notre ère et est considéré comme un ancêtre éloigné des néandertaliens. Ce site exceptionnel, qui a livré 152 fragments humains et près de 400 000 outils et ossements d'animaux, a permis aux scientifiques d'explorer les traces que divers groupes humains y ont laissées durant plus de 500 000 ans. Nous suivons dans ce livre la quête du moindre indice — avec les méthodes technologiques les plus affûtées — qui permettrait de savoir à quoi ils ressemblaient, comment ils vivaient, chassaient, etc. Comment ont-ils pu traverser plusieurs glaciations sans maîtriser le feu ? Étaient-ils vêtus de peaux ou hibernaient-ils ? Autant de questions passionnantes qui trouvent aujourd'hui des amorces de réponse. Passionnant. **Sylvie Rouat**

Origines. Tautavel, notre longue histoire avant Néandertal, Emma Baus, Amélie Viallet, Albin Michel, 192 p., 24,90 €

Redécouvrir l'humanité par ses enfants

RÉCIT On s'intéresse rarement aux enfants du paléolithique supérieur (entre -45 000 et -10 000 ans) et pourtant, ils devaient compter pour environ la moitié de la population de tous les campements ! En les plaçant au centre du récit, le journaliste Pedro Lima nous fait redécouvrir l'ensemble des sociétés humaines et leur évolution durant cette période. Soutenu par des références géographiques précises, enrichi de superbes illustrations de Marina Lezcano, ce livre captivant nous plonge dans le paléolithique supérieur comme dans un roman. **M. N.**

PaléoKids. L'enfance de l'humanité, Pedro Lima, Synops Éditions, 224 p., 22,90 €

EXPOSITIONS

Cherbourg (50)

Océan sur écoute
La Cité de la mer dispose d'un nouvel espace consacré à l'activité sonore sous-marine. Les stations d'écoute du parcours révèlent des sons captés par l'audio-naturaliste Charles Rose, naturels ou artificiels.
Cité de la mer, allée du président-Menut. Rens. : 02.33.20.26.69.

Lattes (34)

Senteurs célestes, arômes du passé
Une exposition sur les parfums et aromates dans l'Antiquité, en Égypte, en Grèce et en Étrurie. Il y est question de médecine, d'hygiène, mais aussi de pratiques culturelles et rituelles.
Site archéologique Lattara – musée Henri-Prades, 390, route de Pérols, jusqu'au 3 février. Rens. : 04.99.54.78.20.

Le Bourget (93)

Flight
Tous les secrets du vol des avions ou des drones, mais aussi des oiseaux, des chauves-souris, des insectes, et même des poissons. Les principes scientifiques et biologiques sont décryptés, avec une comparaison entre le monde naturel et l'aéronautique.
Musée de l'Air et de l'Espace, 3, esplanade de l'Air et de l'Espace, jusqu'au 27 juillet. Rens. : 01.49.92.70.00.

Paris (75)

L'âge atomique
250 œuvres artistiques témoignent de l'imaginaire associé à l'atome, en particulier la bombe atomique. Et de la diversité des prises de position face aux avancées scientifiques sur le sujet.
Musée d'Art moderne, 11, avenue du Président-Wilson, jusqu'au 9 février. Rens. : 01.53.67.40.00.

Notre-Dame de Paris et les cathédrales au XIXe siècle
Plus de 30 dessins, peintures et photographies montrent combien l'étude et la restauration des cathédrales ont servi de creuset technique et artistique. Ces chantiers ont nourri l'architecture contemporaine et l'innovation.
Musée d'Orsay, esplanade Valéry-Giscard-d'Estaing, jusqu'au 2 mars. Rens. : www.musee-orsay.fr

Vins, huiles et parfums
Deux sites retracent cinquante ans de travaux de l'archéologue Jean-Pierre Brun sur l'économie dans l'Empire romain autour de la mer Méditerranée.
Lire notre reportage : sciav.fr/935romain
Collège de France, 11, place Marcelin-Berthelot, et Institut des civilisations, 52, rue du Cardinal-Lemoine, jusqu'au 31 janvier. Rens. : www.college-de-france.fr/fr/vhp

Saint-Étienne (42)

Gigowatt
Cette exposition-atelier propose divers modules interactifs consacrés au futur de l'énergie. Les données scientifiques aident le visiteur à comprendre les enjeux et les solutions possibles.
Soucoupe – La Rotonde, 158, cours Fauriel, jusqu'au 28 juin. Rens. : 04.77.42.02.78.

Solutré-Pouilly (71)

De Toumaï à Sapiens… La longue marche de l'humanité
Toute l'histoire évolutive ayant mené à *Homo sapiens* est racontée. Comment se sont formées les premières sociétés, comment ont été occupées les terres émergées ?
Musée de Préhistoire, chemin de la Roche, jusqu'au 16 mars. Rens. : 03.85.35.82.81.

Paris (75) / Exposition

Paris 1793-1794, une année révolutionnaire

Médaille de la section des Piques, 1793.

© PARIS MUSÉES / MUSÉE CARNAVALET - HISTOIRE DE PARIS

Reliquaire contenant des objets du citoyen Lefèvre de la garde nationale, 1794.

Le 9 Thermidor an II (27 juillet 1794), Robespierre et ses partisans sont arrêtés, mais s'échappent pour se réfugier à l'Hôtel de Ville de Paris. Là, Robespierre rédige un appel à la section des Piques… mais interrompt sa signature. Le document est l'une des pièces de cette exposition audacieuse sur la Terreur révolutionnaire. « *Elle forme ce qu'on appelle un héritage dissonant, une trace du passé qui embarrasse*, explique Guillaume Mazeau, maître de conférences à l'université Paris-I Panthéon Sorbonne et membre du comité scientifique. *Nous n'escamotons pas la dérive autoritaire, la violence. Mais c'est aussi une période chargée en ambivalences.* » Le parcours dévoile des aspects moins connus de cette période, concernant la vie quotidienne, la culture, l'émergence d'un monde ouvrier… Aux légendes et à l'imaginaire, il oppose les faits historiques, sans occulter la justice politique et les prisons pleines à craquer. Une salle aux murs rouge sang et un couperet de guillotine sont là pour rappeler qu'un prévenu sur deux était exécuté. Lire notre reportage : sciav.fr/935terreur ■ **Arnaud Devillard**

Musée Carnavalet, 23, rue de Sévigné, Paris, jusqu'au 16 février. Rens. : sciav.fr/935carnavalet

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

L'HISTOIRE DE FRANCE VUE
PAR LES GRANDES SIGNATURES DU

Nouvel Obs

Albin Michel

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 1.

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec, groupe 3.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CHRISTOPHE CASSOU ET CÉLINE GUIVARCH

Le compte n'est pas bon !

Le rapport 2024 du Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) sur l'écart entre les besoins et les perspectives de réduction des émissions de gaz à effet de serre, est sans équivoque : « Un fossé entre rhétorique et réalité ». Les actions engagées par les États, mais aussi leurs promesses, ne sont pas à la hauteur pour respecter les engagements de l'accord de Paris à l'horizon 2030, pour sécuriser une possible stabilisation du réchauffement global au XXIe siècle, et pour limiter les risques associés. La COP29 de Bakou (Azerbaïdjan) aurait dû servir de tremplin pour accroître l'ambition climatique en amont de la COP30 au Brésil, qui actera la révision quinquennale des engagements au cœur du dispositif de l'accord de Paris de 2015. Elle s'inscrit au contraire dans la lignée des trois précédentes COP, sans avancée sur la réactualisation des engagements depuis la COP26 de Glasgow (Écosse). Les indicateurs ne trompent pas : les émissions mondiales de gaz à effet de serre établissent un nouveau record à 57,1 milliards de tonnes d'équivalent CO_2, 1,3 % de plus qu'en 2022. Elles sont dopées par l'utilisation d'énergies fossiles pour la production d'électricité, la très forte augmentation du transport aérien et routier, les fuites de méthane liées aux énergies fossiles, entre autres. Sans surprise, le niveau de température globale suit : 2024 franchira très probablement le seuil de 1,5 degré sur une année. Le rapport du PNUE pointe la responsabilité des pays du G20 dans le financement des investissements en faveur de l'atténuation. Il faut les multiplier par six au minimum, soit un montant de l'ordre de 900 à 2100 milliards de dollars par an entre 2021 et 2050. À titre de comparaison, l'économie mondiale et les marchés financiers représentent 110 000 milliards de dollars par an. Est-ce si difficile de réorienter les fonds ? Le choix est politique et visiblement, oui, c'est difficile dans un monde de plus en plus fragmenté. ■

Directrice de recherche au CNRS, Institut de recherche en informatique fondamentale (CNRS/université Paris Cité).

CLAIRE MATHIEU

MATHS PAR CLAIRE MATHIEU

La pédagogie de la soustraction

Pour beaucoup, la soustraction est un souvenir douloureux de l'école primaire. Le mathématicien Yves Laszlo m'a fait découvrir un algorithme de soustraction plus simple que ceux qui y sont enseignés. Le voici.
Calculer $x - y$ se fait en trois étapes. D'abord on ajoute ce qu'il faut à x pour que le résultat soit 99…9 (99….9 a le même nombre de chiffres que x.) Ensuite on ajoute la même quantité à y, le transformant ainsi en z. Enfin on calcule 99…9 – z, autrement dit, on ajoute ce qu'il faut à z pour obtenir 99…9. C'est le résultat final de la soustraction. La première et la troisième étape sont de simples complémentations à 9, et la deuxième étape est une addition (possiblement avec retenues). Par exemple, pour calculer 9973 – 1480, on fait les trois étapes suivantes. Ici $x = 9973$ et $y = 1480$. Premièrement, de 9973 à 9999 il y a 26. Deuxièmement, 26 ajoutés à 1480 égalent 1506, donc $z = 1506$. Troisièmement, de 1506 à 9999 il y a 8493, donc le résultat est 8493.
Cet algorithme est une variante du complément à 2 dans l'ordinateur Edvac proposé par John von Neumann en 1945 pour effectuer plus simplement les opérations arithmétiques. Avec cette méthode, si on sait faire une addition avec retenues, alors on sait faire une soustraction. La méthode d'Yves Laszlo n'est-elle pas plus simple et plus pédagogique que celles qui sont enseignées à l'école primaire en France ? ■

ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

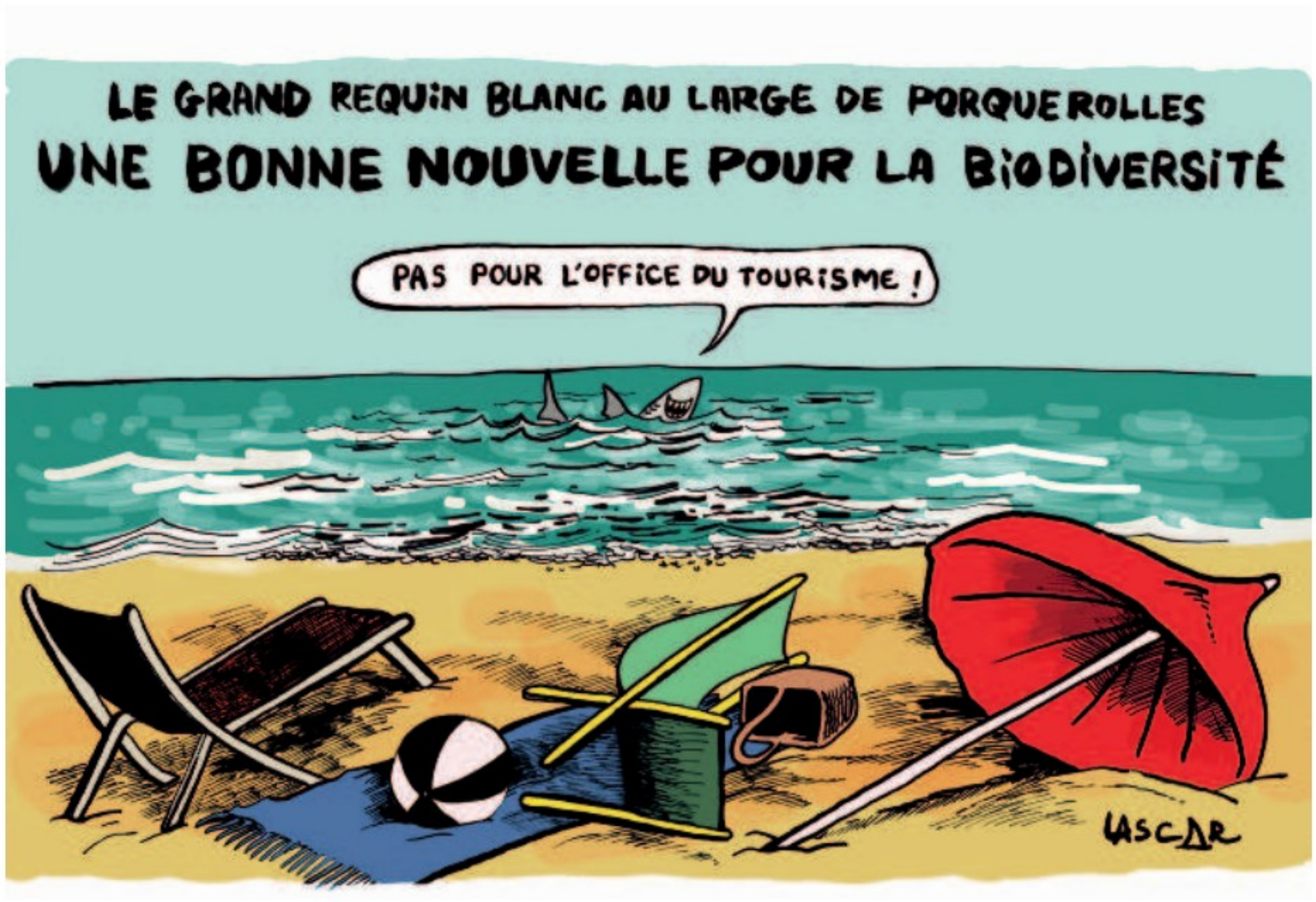
L'auteur meurt-il une deuxième fois avec l'IA générative ?

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *L'I.A. expliquée aux humains*, Seuil, 2024.

Les néostructuralistes français, en particulier Roland Barthes et Michel Foucault, l'annoncèrent en fanfare dans les années 1970 : l'auteur était mort au profit du lecteur et, surtout, de *« l'instaurateur de discursivité »* qui, tel Marx ou Freud, donnait les clefs de lecture de ses œuvres. Aujourd'hui, avec l'intelligence artificielle générative et les grands modèles de langage (LLM) tels GPT, Claude ou Mistral, la figure de l'auteur se trouve de nouveau écornée. Mais, ce ne sont pas uniquement des gens de lettres, écrivains, romanciers ou dramaturges qui en pâtissent ; ce sont aussi les chercheurs et tous ceux qui sont condamnés, pour reprendre le vieil adage *publish or perish*, à écrire et publier pour exister. En effet, les LLM mettent à disposition de tous une palette d'outils pour faciliter l'écriture, la correction, l'édition, voire la production d'articles scientifiques. On mentionne d'ailleurs, depuis plusieurs années, l'existence d'officines qui offrent à des chercheurs peu scrupuleux la possibilité de rédiger automatiquement des textes avec ce que l'on appelle des « usines à papier » (*paper mills* en anglais). Personne ne s'offusque de l'utilisation de correcteurs orthographiques ou syntaxiques, voire d'outils de traduction automatique, à condition que ça reste sous la responsabilité des signataires, mais tous condamnent l'emploi de générateurs automatiques. Jusqu'où aller pour maintenir l'intégrité scientifique ? Pour l'heure, les éditeurs ne s'accordent pas tout à fait. Certains, tels Sage (1) ou Elsevier (2), demandent de déclarer les outils d'IA générative utilisés pour écrire ou faire des graphiques. D'autres, comme *Nature* (3), trouvent que c'est inutile, et qu'on ne doit en aucun cas les considérer comme auteurs. Cependant, tous recommandent leur emploi pour polir le style. Avec les LLM, on appareille les auteurs pour s'assurer de la conformité de leurs écrits aux canons stylistiques imposés par les éditeurs, ce qui revient en quelque sorte à les faire disparaître une seconde fois. ■

(1) sciav.fr/935Sage ; (2) sciav.fr/935Elsevier ; (3) sciav.fr/935Nature.

BRUNO LÉVY



L'ŒIL DE LASCAR

Un spécimen de grand requin blanc a été filmé par un pêcheur en novembre au large de Porquerolles, dans le Var. La présence de *Carcharodon carcharias* en Méditerranée est connue depuis l'Antiquité, mais il y est désormais classé en danger critique d'extinction par l'Union internationale pour la conservation de la nature. Entre 1600 et aujourd'hui, il y a eu seulement *« 794 observations de grands requins blancs en Méditerranée »*, explique à *Sciences et Avenir* Nicolas Ziani, directeur du Groupe phocéen d'étude des requins. **O. L.**

QUESTIONS DE LECTEURS

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

ASTROPHYSIQUE

Quelle est la température du Soleil ?

Silver K.

Au cœur du Soleil, où se produit la fusion nucléaire, la température atteint 15 millions de degrés ! Mais plus on s'éloigne du centre de notre étoile, plus la température diminue. On enregistre « seulement » 2 millions de degrés dans la zone directement autour du cœur, dite de radiation. La zone de convection, encore plus éloignée du centre, connaît quant à elle des écarts considérables (de 2 millions à 5500 °C). Cela crée un bouillonnement engendrant notamment un puissant champ magnétique. Et dans l'atmosphère solaire, rien ne va plus ! Les températures baissent jusqu'à 4000 °C au niveau de la chromosphère, puis remontent brutalement jusqu'à 3 millions de degrés dans la couronne, la couche externe du Soleil. Des écarts étonnants qui ne trouvent pas encore d'explication claire. ■ **L. L.**

ASTRONOMIE

Où se trouve le meilleur endroit sur Terre pour observer les étoiles ?

Layani V.

Selon une équipe internationale de chercheurs menée par l'Académie chinoise des sciences, le meilleur endroit sur Terre pour contempler les étoiles est le Dôme A, la plus haute montagne de glace de l'Antarctique (4093 m d'altitude), située à 1200 km à l'intérieur du continent. Ce site se distingue par une atmosphère d'une stabilité extrême. De plus, le scintillement des étoiles, ce vacillement de la lumière provoqué par les turbulences de l'atmosphère, y est considérablement réduit. Grâce à un télescope installé sur le Dôme A, les chercheurs ont obtenu des images du ciel d'une netteté inégalée. ■ **L. L.**

La variété des pelages du chat domestique est le résultat de croisements opérés par l'humain et d'une pression environnementale moindre que dans la nature.

ZOOLOGIE

Pourquoi toutes les espèces de félins ont-elles des pelages identiques, sauf le chat ?

Guillaume G.

Tigres, lions, panthères, lynx… Ils ont beau appartenir à la même grande famille des félins, l'apparence de leur pelage, régie par une dizaine de gènes (comme le gène Tabby qui entraîne la présence de motifs rayés ou le gène TYRP1 qui influence les nuances de noir), varie pour s'adapter à leur environnement. Ce qui facilite le camouflage, donc la survie de leur espèce. Ainsi, les tigres ont des rayures qui leur permettent de se dissimuler dans les hautes herbes et les forêts tropicales, où la lumière forme des ombres qui brisent les contours de leur corps. Les léopards et panthères présentent des taches ou des rosettes, grâce auxquelles ils se fondent dans les paysages forestiers ou montagneux. Quant aux lions, qui vivent souvent dans des environnements plus ouverts comme les savanes, ils n'ont pas besoin de motifs élaborés pour se camoufler, car ils chassent souvent en groupe, la stratégie collective prenant le pas sur la furtivité individuelle.

Le chat domestique, issu du chat sauvage africain *Felis lybica*, a évolué dans un contexte différent. Sa domestication (ou plutôt son apprivoisement, *lire* S. et A. *n° 907*), il y a environ 10 000 ans, a entraîné une grande variété de pelages en raison des croisements, de la sélection humaine et des conditions environnementales, moins strictes que dans la nature. Contrairement aux grands félins, les chats domestiques n'ont plus besoin de se camoufler dans un environnement spécifique pour survivre, ce qui a permis une plus grande diversité de motifs et de couleurs de leur pelage. ■ **Lise Loumé**

MARK TAYLOR/ NATUREPL/ EBPHOTO

LE CIEL DE JANVIER

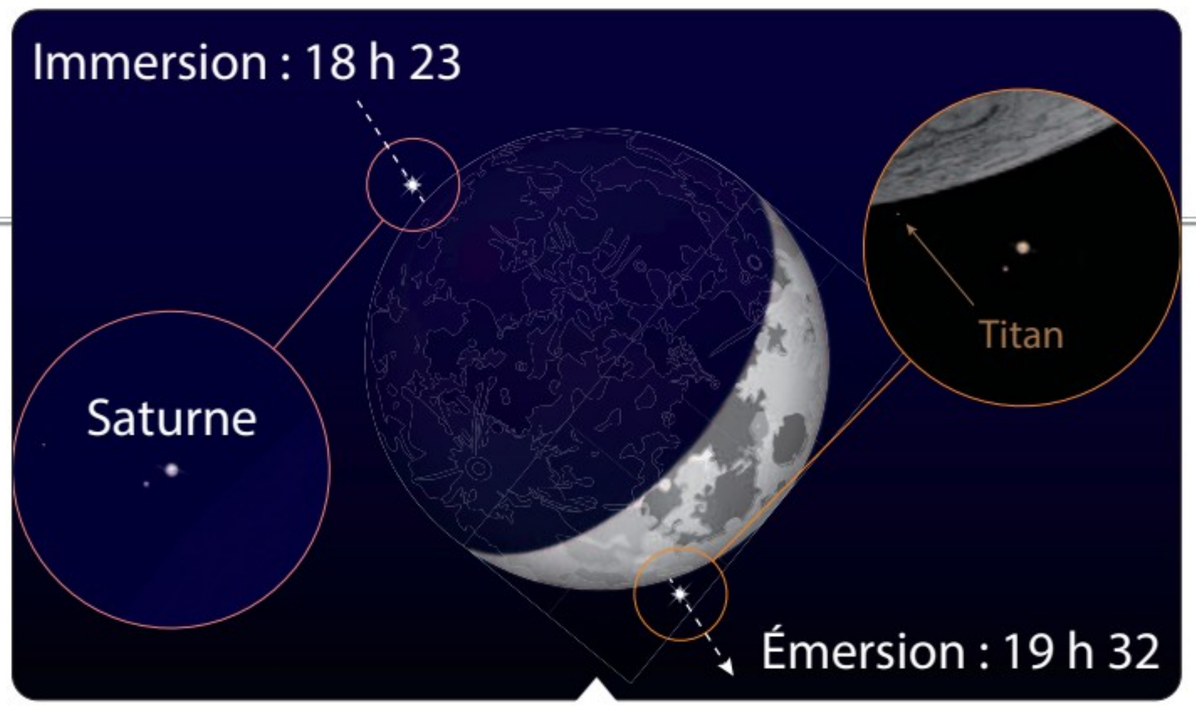
PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

MERCURE Durant la première semaine de janvier, la petite planète est observable bas vers le sud-est un peu avant le lever du Soleil. Par la suite, noyée dans les lueurs de l'aube, elle disparaît.

VÉNUS L'étoile du Berger atteint sa plus grande distance angulaire (47°) à l'est de l'astre du jour le 10. Elle est immanquable dans le ciel en soirée, brillant intensément à bonne hauteur au-dessus de l'horizon sud-ouest.

MARS La planète Rouge passe à l'opposition le 16 dans la constellation des Gémeaux. Visible toute la nuit, elle se trouve dans des conditions d'observation optimales et culmine très haut dans le ciel de milieu de nuit. Son éclat caramel est facilement perceptible.



Les heures sont données pour Paris et peuvent varier de quelques minutes selon votre localisation. À noter que le point sous Saturne est une étoile alors que Titan, son plus gros satellite, est visible plus loin sur la gauche.

La Lune occulte Saturne

LE SOIR DU 4, ENTRE 18 H 23 ET 19 H 32, la Lune passera devant la lointaine Saturne. D'un bout à l'autre, les anneaux de la planète mettront environ une minute à disparaître lors de l'immersion puis à réapparaître lors de l'émersion, alors que son disque le fera en quelque 30 secondes.

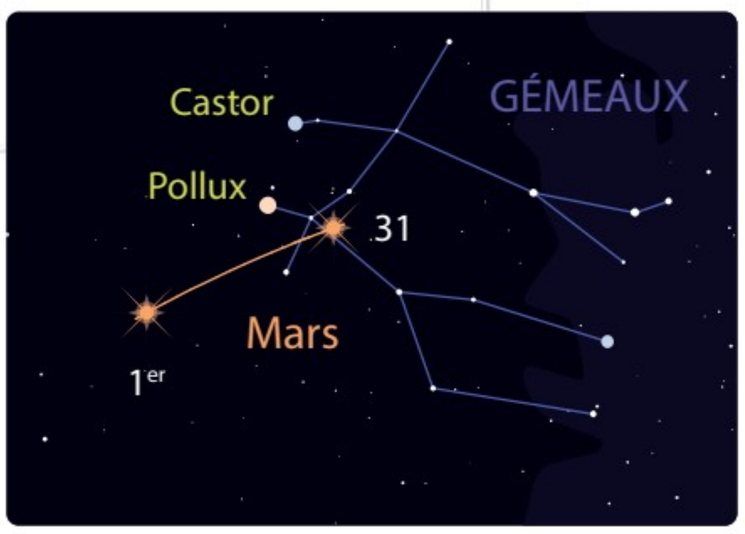
Notre conseil Le phénomène est visible à l'œil nu mais sera plus impressionnant aux jumelles, et encore plus spectaculaire avec un télescope, qui révélera les célèbres anneaux.

JUPITER Un mois après son passage à l'opposition, la planète géante demeure dans de très bonnes conditions d'observation. Visible dès le crépuscule, elle est l'astre ponctuel le plus brillant du ciel... une fois Vénus couchée.

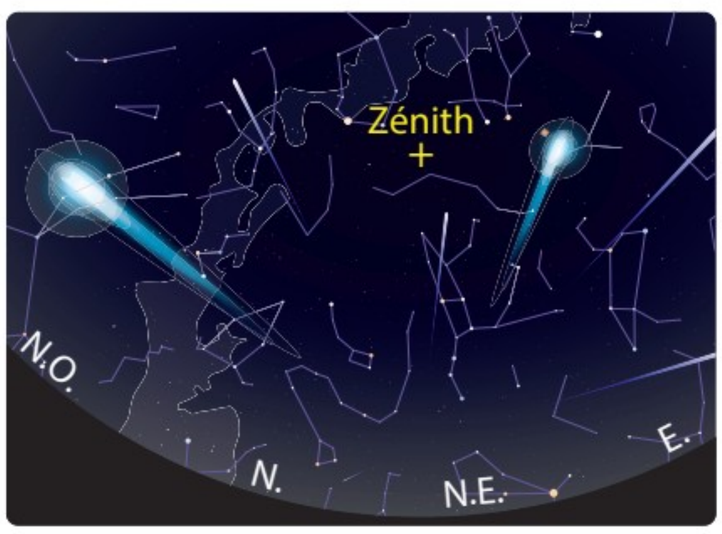
SATURNE La planète aux anneaux n'est plus visible qu'en soirée et se couche de plus en plus tôt. Sa proximité avec Vénus ce mois facilite son repérage.

L'appli du mois

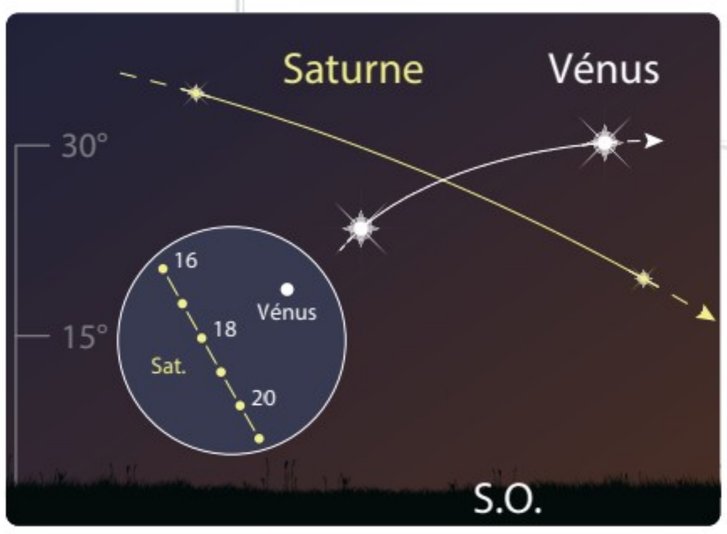
NASA'S FIRST WOMAN est une application gratuite créée par la Nasa (en anglais et en espagnol) pour Android et iOS. Il s'agit d'un roman graphique pédagogique et interactif où l'on suit les aventures d'un personnage de fiction, Callie Rodriguez, première femme sur la Lune. Certaines scènes peuvent être vécues grâce à la réalité virtuelle.



TOUT CE MOIS, MARS POSSÈDE UN MOUVEMENT RÉTROGRADE et s'aventure dans la constellation des Gémeaux, où elle croise la route des célèbres étoiles Castor et Pollux.



DANS LA NUIT DU 3 AU 4, LA BELLE PLUIE D'ÉTOILES FILANTES des Quadrantides atteindra son maximum avec quelques dizaines de météores par heure. Il est ici 3 heures du matin.



DÈS LE MILIEU DU MOIS ET PENDANT UNE SEMAINE ENVIRON, 1 H APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, Vénus et Saturne seront observables dans le même champ d'une paire de jumelles.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel de janvier

JEUX

PAR PIERRE BERLOQUIN

SOLUTIONS DANS LE PROCHAIN NUMÉRO

▸ À pas comptés

Le bal costumé chez le marquis de Petipa bat son plein : valses endiablées, cotillons…

Les invités, dont 80 % sont déguisés, se répartissent dans les trois pièces de réception (50, 30 et 20 m^2).

Un observateur attentif remarque :

- Il y a dans la grande pièce deux fois plus d'invités au mètre carré que dans les deux autres, mais partout la même proportion de personnes déguisées.

- Huit personnes non déguisées se trouvent dans la plus petite pièce.

Combien y a-t-il d'invités ?

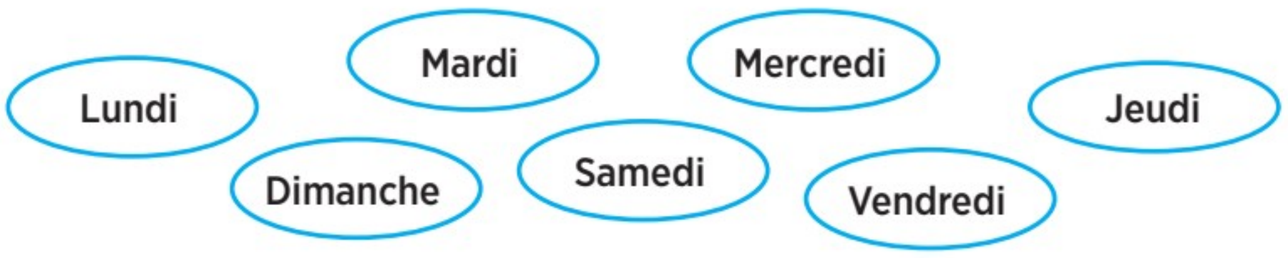
▸ Quel prix manque ?

Trouvez le prix manquant parmi cette liste d'étranges produits.

Cornichons sautés	4
Spaghettis briochés	2
Omelette bleue	3
Fromages secs	4
Abricots frits	3
Café mûr	?

▸ Logique calendaire

Les jours de la semaine vont de soi, mais ne peut-on pas distinguer certains d'entre eux par une caractéristique qui les fait ressortir ? Par exemple, « dimanche » est le seul jour commençant par « di ». Saurez-vous en trouver au moins 7 autres ?



▸ Désordre logique

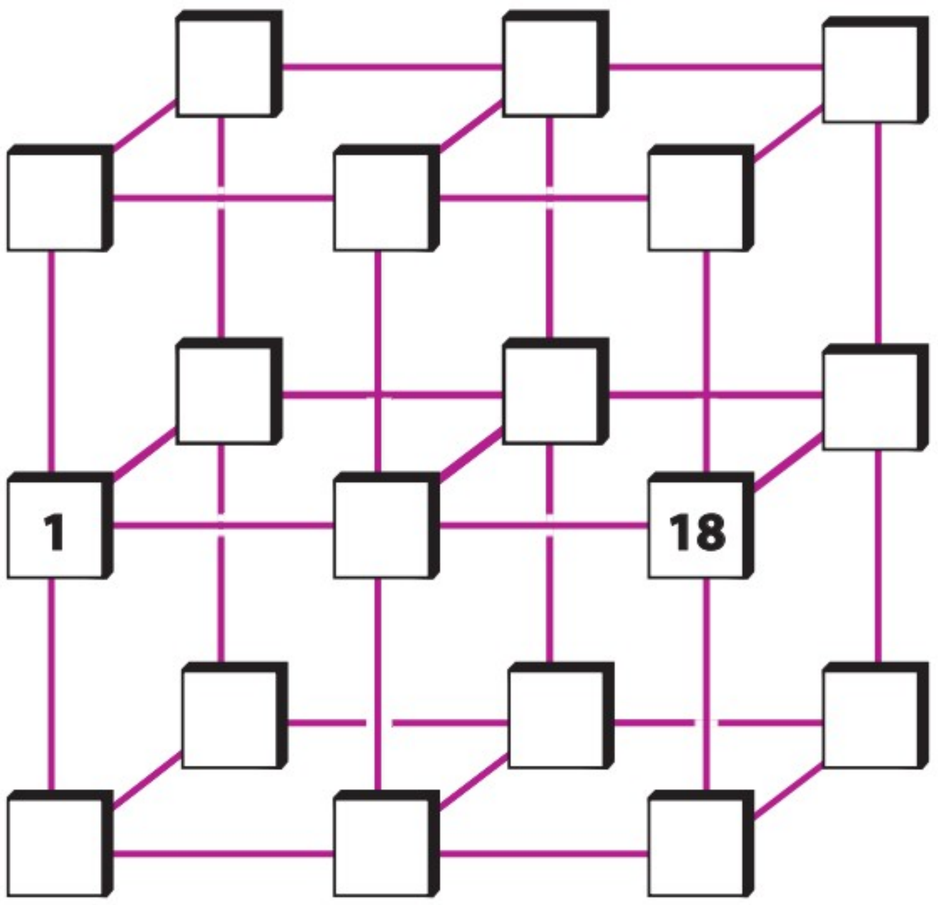
Quel bouleversement systématique a subi cette phrase d'Helvétius ?

Dignité en élevés plus sont tient la on qui avec ceux que proportion à plate devient conversation la.

▸ Sudoku spatial

Complétez ces cubes avec les nombres de 1 à 18 de telle sorte que deux nombres qui se suivent, par exemple 3 et 4, ne se touchent pas par une arête de cube. 1 et 18 sont déjà en place.

Il y a plusieurs solutions. En trouverez-vous une ?



Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir » n° 934, décembre 2024

▸ Phrase bouleversante

Dans les critiques que nous faisons, nous jugeons encore moins les autres que nous ne nous jugeons nous-mêmes. (par groupes de 3 mots, on prend successivement les premiers, les deuxièmes, etc.).

▸ Alphaddition

4231 + 4231 = 8462

▸ Entre lacs #2

Côme, Aral, Tenno, Baïkal, Huron, Jipe, Zoug, Érié, Tana, Ours, Léman, Do.

▸ Chasse aux signes

(1 + 2) / 3 + 4 + 5 + 6 + 7 + 8 + 9 = 40

▸ Logique privée

Soit Cécilia dit la vérité, elle est donc la seule à dire vrai ; alors Laura et Sandra ont menti ; elles ont donc tué toutes les deux. Or, une seule femme a tué. Cécilia a donc menti, ce qui implique qu'il est faux qu'une femme seulement ait dit la vérité. Dès lors, soit Laura et Sandra ont menti toutes les deux (mais alors elles auraient commis le crime à deux), soit elles disent toutes les deux la vérité. Seule, Cécilia peut donc être la criminelle.

Énigmes Créalude, Pierre Berloquin

Cap sur les côtes albanaises

LES CROISIÈRES DU SAVOIR SCIENCES ET AVENIR

Du 5 au 14 avril 2025

VOS ACCOMPAGNATEURS SCIENCES ET AVENIR

Bruno David
Naturaliste, ancien président du Muséum national d'histoire naturelle, auteur de nombreux livres dont *Le Monde Vivant* avec Guillaume Lecointre (Grasset, 2022).

Claude Sintès
Archéologue, conservateur en chef honoraire du patrimoine, ancien directeur du Musée départemental Arles antique, chercheur associé auprès du CNRS.

Philippe Chalmin
Professeur d'histoire économique à l'université Paris-Dauphine, président fondateur de CyclOpe, le principal institut de recherche européen sur les marchés des matières premières.

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef de Sciences et Avenir

2025 sera l'année de la mer, avec en point d'orgue la troisième « Cop Océan » qui se tiendra à Nice en juin. Aussi, c'est en compagnie d'éminents spécialistes du monde marin que nous vous proposons de partir cette année en « Croisière du savoir ». Direction : la mer Ionienne et la mer Adriatique. Notre voyage partira d'Athènes pour arriver à Venise. Avec en point d'orgue l'Albanie. Située au carrefour des grandes voies antiques reliant l'Orient et l'Occident, sur la côte occidentale de la péninsule balkanique, l'Albanie est l'un des plus petits pays d'Europe mais qui a hérité d'un riche passé historique. Notre voyage sera l'occasion de découvrir certains de ses trésors antiques, avec des escales à proximité des sites archéologiques majeurs de Butrint, l'antique Bouthrôtos, et d'Apollonia d'Illyrie. Auparavant, nous irons à Corfou, grecque et vénitienne, et par la suite au Monténégro dans le golfe de Kotor, d'une surprenante beauté.
Mais les Croisières du savoir sont avant tout la promesse d'échanges culturels avec des experts scientifiques qui auront plaisir à partager vos émotions. À commencer par la participation exceptionnelle de Bruno David. Sa passion : les échinodermes, mais il possède une connaissance très fine de l'ensemble du monde marin. Il nous parlera des spécificités de la Méditerranée et de la biodiversité qu'elle abrite. Claude Sintès, connu pour avoir dirigé le Musée départemental Arles antique et pour ses fouilles en Lybie, est également un spécialiste de la navigation et de la piraterie dans l'Antiquité. Enfin, Philippe Chalmin, que d'aucuns surnomment le « pape des matières premières », nous racontera comment l'Adriatique a été au cœur du développement des échanges, du commerce international et du capitalisme marchand. *M.N.*

MS Hamburg

Notre croisière se déroulera à bord du « MS Hamburg », un navire à taille humaine n'accueillant pas plus de 380 passagers avec trois espaces de conférences. Il répond aux dernières exigences environnementales sur les carburants, l'échappement et le traitement des déchets. Il est exploité avec du diesel marin à faible teneur en soufre au lieu de l'huile lourde, conformément aux normes ISO actuelles et aux spécifications de MARPOL/OMI. Toutes les eaux usées sont traitées et purifiées avant d'être renvoyées hors du navire en qualité d'eau potable.

À partir de 2 490 €/pers.
en cabine intérieure occupée par 2 personnes, vols internationaux inclus

Jour	Escales	Arrivée	Départ
05/04	Paris / Athènes / Le Pirée (Grèce)	-	23h00
06/04	Nauplie (Grèce)	07h30	18h00
07/04	Katakolon (Grèce)	13h00	18h00
08/04	Corfou (Grèce)	07h00	00h00
09/04	Saranda (Albanie)	07h00	21h00
10/04	Vlore (Albanie)	07h00	23h00
11/04	Durres (Albanie)	07h00	20h00
12/04	Kotor (Montenegro)	07h00	11h30
13/04	Ancone (Italie)	09h00	20h00
14/04	Venise (Italie) / Paris	08h00	

photo : Apollonia d'Illyrie, Albanie

RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS :

PLEIN CAP « Croisières du Savoir »
CROISIÈRES PLEIN CAP : 251 ROUTE DE LA COLLE - 06270 VILLENEUVE-LOUBET
info@plein-cap.com - www.croisiere-du-savoir.fr - Tél. 04 93 20 21 20

Tous vos vœux

dans le même panier

Avec Open

Fibre
2 mois offerts

+

Forfait mobile
120 Go 5G

49,98 €/mois[1][2]
au lieu de ~~64,98 €~~/mois
Un prix qui n'est pas près de bouger.

Pour les nouveaux clients avec souscription concomitante de la Série Spéciale Livebox Fibre à 34,99 €/mois[1] remboursée pendant 2 mois[2] (au lieu de 39,99 €/mois) et de la Série Spéciale 120 Go 5G à 14,99 €/mois[1][2] (au lieu de 24,99 €/mois).

Offre soumise à conditions valable du 21/11/2024 au 05/02/2025 en France métropolitaine sur réseau et mobiles compatibles. Engagement 12 mois. Activation SIM : 10 €. 5G en cours de déploiement : couverture détaillée et différenciée sur reseaux.orange.fr
(1) Tarif incluant une remise de 5€/mois. **(2)** Tarif incluant un remboursement différé sur facture de 5 €/mois pour le mobile et de 34,99 €/mois pour la Fibre à partir de la 2e facture après validation de la demande. Non cumulable. Perte de la remise ou du remboursement en cas de résiliation ou de modification d'offre.

orange™
est là